



النظرية النسبية "العامة والفظة"

ألبرت أينشتاين

مقدمة المؤلف

أتمنى لهذا الكتاب أن يوفر للقارئ الذى يهتم بدراسة نظرية النسبية فلسفيا وعمليا وسيلة سهلة يحقق بها أمله فى دراستها دراسة تامة حتى ولو لم يكن متمكنا من الجهاز الرياضى الذى تتطلبه دراسة الفيزياء النظرية . وعلى الرغم من قلة صفحات هذا الكتاب فإن قراءته تستلزم عزمًا لايلين ومثابرة على تعمق الفكر ومستوى ثقافيا يضارع مستوى القبول فى الجامعات . ولقد بذلت غاية الجهد فى سبيل توضيح الافكار الأساسية أحسن إيضاح فوضعتها فى أبسط صورة وأسهلها فهما . أما من حيث التسلسل والإرتباط فقد تركتها فى مجموعها على سجيته مثلما خطرت لى أصلا . ولم أدخر وسعاً فى سبيل الوضوح الكامل فلم أسلم فى كثير من المواقع من التكرار ولم أهتم أى اهتمام ببلاغة الأسلوب وطلأوته فإننى مثل ل . بولتزمان - ذلك العالم الفذ - أعتقد أن أمور التألق يجب تركها للترزى والإسكاف . ولست أدعى أنى قد باعدت بين القارئ والصعوبات المتصلة بالموضوع إنما قصدت إلى معالجة الأساس الفيزيائى التجريبي للنظرية بطريقة حانية عمادها التيسير والرفق حتى لا أترك القارئ الذى لا يلم بالفيزياء يشعر بالثيى أو بالضياى كمن أضلته الأشجار عن الغابة . إنى أتمنى أن يهينى هذا الكتاب للقراء لحظات من التفكير الملهم .

أ. أينشتين

ديسمبر ١٩١٦

تعليق بمناسبة الطبعة الخامسة عشر

لقد أضفت فى هذه الطبعة الخامسة عشرة ملحقا خامسا يتضمن آرائى فى مشكلة المكان عموما والتغيرات التدريجية التى طرأت على تصورنا له نتيجة لوجهة النظر « النسبية » لقد أردت أن أوضح أن المكان ليس بالضرورة شيئا يمكن أن نمثله وجودا منفصلا بطريقة مستقلة عن الأجسام الموجودة فعلا فى دنيا المادة . إن الأجسام المادية ليست «فى المكان» بل هى « امتداد مكاني » وبهذه الطريقة يفقد «تصور المكان الفارغ» معناه .

أ. أينشتاين

٩ يونيو سنة ١٩٥٢

الجزء الأول

نظرية النسبية الخاصة



الفصل الأول

المعنى الفيزيائي للقضايا الهندسية

لعل الغالبية الكبرى ممن يقرءون هذا الكتاب قد تعرفوا فى حياتهم الدراسية على ما فى هندسة إقليدس من منطق نبيل ولعلمهم يذكرون - احتراماً لا حياء - ذلك الصرح الشامخ الذى ساقهم فى تسلق درجة أساتذة أمماء مهرة طوال ساعات لا حصر لها . ولاشك أن القارئ سينظر بعين الريبة والازدراء إلى كل من يجروء على التشكيك فى صدق أية قضية من قضايا الهندسة ونظرياتها مهما كانت ثانوية . ولاشك أن السر فى ذلك هو ما تولد فى نفس القارئ خلال تجربته السابقة مع الهندسة من شعور وطيد بالثقة . ولكن ... أليس لهذه الثقة حدود ... ؟ لو أن أحداً سألك أيها القارئ العزيز : ماذا تعنى بتأكيدك أن هذه القضايا صادقة ؟ لعلك لو تأملت قليلاً مضمون هذا السؤال والآفاق التى يفتحها أمامنا لرأيت أركان هذه الثقة الكاملة قد اهتزت واكتفتها الظلال . ولذلك أعتقد أنه لابد لنا أن نتأمل هذا الأمر معاً بإمعان وروية .

إن الهندسة تتبع من تصورات معينة مثل تصور المستوى والنقطة والمستقيم . ونحن نستطيع أن نربط بهذه التصورات أفكاراً محددة نوعاً ما

نتمثلها جيدا . والهندسة تقوم بجانب ذلك على قضايا بسيطة معينة «بديهيات» ونحن نميل بسبب حسن تصورنا لتلك الأفكار المحددة إلى التسليم بأن هذه البديهيات صادقة . ثم بطريقة منطقية دامغة لاسيبل إلى إنكار وجاهتها نقيم الدليل على أن كل القضايا الباقية تتسلسل من البديهيات ، أى أننا نقيم بذلك البرهان عليها . ومن هنا نرى أن قضايا الهندسة تكون صحيحة صادقة عندما تكون مشتقة من البديهيات على النحو المسلم به . وهكذا نجد أن البحث فى «صدق» القضية الهندسية الواحدة يتحول فى آخر الأمر إلى البحث فى «صدق البديهيات» . ولكننا قد عرفنا منذ أمد بعيد أن البحث فى صدق البديهيات لا يمكن معالجته بالطرق الهندسية بل إنه لا معنى له بالكلية فلا وجه لأن نتساءل مثلا إن كان صدقاً أنه لا يوجد إلا خط مستقيم واحد يصل بين نقطتين أم لا . كل ما يمكن أن نقوله هو أن هندسة إقليدس تعالج أشياء تسميها «خطوطا مستقيمة» وتنسب لأى واحد منها خاصية التعيين بذاته بنقطتين واقعتين عليه : ونحن نعلم أن التصور الذى نعبر عنه بكلمة «صادق» نقصد به عادة شئ له وجود حقيقى . (والهندسة ليست معنية بعلاقات المفاهيم الداخلة فيها بالأشياء الواقعية ولكنها معنية فقط بالصلات المنطقية لهذه المفاهيم فيما بينها .

وليس من العسير أن نرى لماذا كنا على الرغم من هذا مسوقين إلى القول «بصحة» القضايا الهندسية . فالمفاهيم الهندسية تناظر إن كثيرا أو قليلا أشياء بالذات لها وجود فى الطبيعة ، وهذه الأشياء دون ريب

السبب الوحيد فى نشأة هذه المفاهيم . ولاشك أنه يجب على الهندسة أن تتنكب هذا الطريق إذا أرادت أن يكون لبنائها أكبر وحدة منطقية ممكنة . خذ مثلاً تلك العادة المتأصلة فى تفكيرنا فى أن كل ما فى المسافة هو موضع نقطتين على جسم متماسك . أو أيضاً ما درجنا عليه من اعتبار ثلاث نقط على استقامة واحدة إذا استطعنا أن نجعل مواضعها الظاهرية تنطبق على مسار شعاع بصرى واحد ، وذلك إذا أحسنا اختيار الموضع الذى نرصد منه هذه النقط الثلاث .

ولكننا نستطيع أن نستعيد ثقتنا الأولى إلى حد ما وذلك إذا أضفنا إلى قضايا هندسة إقليدس القضية التالية : «تناظر نقطتان على جسم جاسئ نفس المسافة دائماً (الفترة الخطية) مهما حدث من تغيرات فى موضع الجسم » عند ذلك نجد أن قضايا هندسة إقليدس تتحول فجأة إلى قضايا عن المواضع النسبية الممكنة للأجسام الجاسئة^(١) . والهندسة التى أكملت بهذه الصورة يجب أن تعالج على اعتبارها فرعاً من الفيزياء^(٢) .

(١) يتبع هذا أن يرتبط جسم طبعى بخط مستقيم وهكذا تقع النقط أ ، ب ، ج على جسم جاسئ على خط مستقيم حينما نختار النقطة ب وقد حددنا من قبل النقطتين أ ، ج بحيث يكون مجموع المسافتين أ ب ، ب ج أقصر ما يكون . وسيفى هذا الاقتراح الناقص بالغرض الذى ننشده حالياً .

(٢) هذا هو ما يسمى بفيزياء الهندسة وهو حجر الزاوية الذى شاد عليه ريمان هندسة الفضاء الكروى المنحنى مترسماً خطى لوياتشفسكى أبو الهندسات اللاقليدية وجاوس الذى اهتدى إلى الوسيلة الرياضية العامة للدراسة المتصلات متعددة الأبعاد . وإذا =

ويحق لنا عندئذ أن نتساءل عن صدق قضايا الهندسة مفسرة على هذا النحو . لأننا أصبحنا نستطيع أن نختبر هل تتفق فعلا هذه القضايا مع الأشياء الحقيقية التى ربطناها فيما سبق بالأفكار الهندسية أم لا . أو بعبارة أخرى - ولو أنها أقل دقة - يمكننا أن نعبر عن ذلك بأن نقول إننا نقصد بصدق قضية هندسية ما بهذا المعنى قابليتها للتنفيذ باستعمال المسطرة والفرجار .

وهكذا نرى بوضوح أن الاقتناع بصدق القضايا الهندسية بهذا المعنى يستند كلية على تجربة لا يمكن اعتبارها بحال من الأحوال كاملة بل هى أقرب ما تكون إلى النقص ولكننا مع ذلك سنسلم الآن بصدق القضايا الهندسية وسنرى فيما بعد (فى نظرية النسبية العامة) أن هذا الصدق محدود ، وسنحاول أن نعين مدى هذه الحدود .

= أضفنا إلى هذه الأفكار فكرة تساوى الكتلة القصورية والكتلة الجاذبية حصلنا على هيكل نظرية النسبية العامة (الترجم) .

الفصل الثانى

مجموعة الإحداثيات

لقد شرحنا فى الفصل السابق التفسير الفيزيائى للمسافة واستناداً إلى هذا التفسير نستطيع أن نحدد بسهولة المسافة التى تفصل بين نقطتين على جسم جاسىء وذلك بواسطة القياس . وكل ما نحتاج إليه للقيام بعملية القياس هو «مسافة ما» ولتكن «القضيب ل مثلاً» نتفق عليها مقدماً ونعتبرها وحدة عيارية للقياس فإذا كانت أ ، ب نقطتين على جسم جاسىء فإننا نستطيع إنشاء الخط الذى يوصل بينهما بالطرق الهندسية ونستطيع ابتداء من أ أن نطبق القضيب على هذا الخط وأن نكرر ذلك بحيث تطابق نقطة ابتدائه فى كل مرة نهايته فى المرة السابقة إلى أن نصل إلى ب ، وعدد مرات تكرار هذه العملية هو القياس العددى للمسافة أ ب . إن هذا هو أساس كل عمليات قياس الأطوال^(١).

إن كل وصف لمسرح أية حادثة أو لموضع جسم ما فى الفضاء يستند

(١) لقد فرضنا هنا أنه لم يتبق شيء أى نتيجة القياس عدد صحيح ونحن نتغلب على هذه المشكلة أيضاً باستعمال قضبان القياس المقسمة إلى أجزاء واستعمالها على هذه الصورة لا يتطلب تعديلاً جوهرياً فى طريقة القياس .

أساساً إلى تعيين النقطة التى تناظر مسرح الحادثة أو موضع الجسم من
نقط مجموعة الإسناد . وليس هذا النحو فى وصف مسارح الحوادث
ومواضع الأجسام وفقاً على العلم وحده بل إنه فى الواقع عين ما نلجأ إليه
فى حياتنا اليومية . إننا إذا تأملنا تحليلياً التحديد المكاني : «حادثة فى
ميدان التحرير بالقاهرة مثلاً» أمكن أن نصل بسهولة إلى النتيجة التالية :
إن الأرض هى مجموعة الإسناد التى تسند إليها التعيين المكاني ، وميدان
التحرير نقطة محددة جيداً على سطح الأرض أطلق عليها هذا الاسم وهذه
النقطة هى النقطة التى تتفق ومسرح الحادثة فى المكان^(١) .

وهذه الطريقة البدائية فى تعيين المكان لا تصلح إلا بالنسبة للأماكن
التي تقع على سطوح الأجسام الجاسئة وبشرط وجود نقط على هذه
الأجسام يمكن تمييزها عن غيرها من النقط . ولكننا نستطيع أن نتحرر من
كل هذه القيود دون أن نغير الأساس الذى نعتمد عليه فى تعيين
المواضع . فإذا كانت هناك سحابة فوق ميدان التحرير مثلاً فإننا نستطيع
أن نعين مكانها بالنسبة إلى سطح الأرض بأن نقيم عموداً يصل بينها وبين
الميدان وطول هذا العمود مقيساً بقضيب القياس العياري مشتركاً مع ما
يحدد نقطة قاعدة العمود يعطينا معاً تحديداً كاملاً لموضع السحابة فى
الفضاء . ومن هذا المثل نرى بوضوح الطريقة التى تم بها تهذيب الفكرة

(١) ليس من الضروري هنا أن نقصى إلى أبعد من ذلك معنى عبارة الاتفاق فى المكان
فهذا التصور واضح البوضوح الكافى لتجنب اختلاف الرأى حول إمكان تطبيقه
عملياً .

الأساسية فى عملية تحديد المواضع عموماً . وتتلخص خطوات هذه العملية فيما يلى :

(أ) أن تتخيل الجسم الجاسىء الذى نسند إليه التعيين المكاني مزوداً على نحو يمكنه من الوصول إلى الجسم المراد تعيين موضعه .

(ب) نستعمل فى تحديد موضع الجسم عدداً بدلا من الالتجاء إلى نقط إسناد معينة (وهو فى هذه الحالة طول العمود مقيساً بقضيب القياس «وحدة القياس») .

(جـ) نستطيع أن نحصل على ارتفاع السحابة حتى ولو لم نعلم العمود فعلا فتحن إذا رصدنا السحابة ضوئياً من مواقع مختلفة على الأرض . وإذا أدخلنا فى حسابنا خواص انتشار الضوء نستطيع أن نعين طول العمود الذى كان علينا أن نقيمه حتى نصل إلى السحابة .

مما تقدم نرى أنه سيكون من المستحسن لو أمكن عند وصف المواقع عموماً أن نتحرر بطريقة القياسات العددية من ضرورة الالتجاء إلى ذكر مواقع معينة لها أسماء خاصة تتميز بها على مجموعة الإسناد التى نرجع إليها . ونحن نحقق ذلك فى القياسات الفيزيائية بتطبيق مجموعة إحدائيات ديكارت .

وهى تتكون من ثلاثة سطوح مستوية متعامدة ومرتبطة ارتباطاً جاسئاً بجسم جاسىء . وبتحديد موقع أية حادثة إذا أسندناه إلى مجموعة الإسناد بتعيين أطوال ثلاثة الأعمدة أو الإحدائيات (س . ص . ع) التى

يمكن إسقاطها من مسرح الحادثة على ثلاثة السطوح المستوية التي تكون مجموعة الإسناد . وأطوال هذه الأعمدة الثلاثة يمكن تحديدها بسلسلة من عمليات القياس تتم باستعمال قضبان القياس تبعاً للقواعد والطرق التي وضعتها هندسة إقليدس .

وليس من المستطاع دائماً في الحياة العملية الحصول على السطوح الجاسئة التي تتكون منها مجموعة الإسناد ، وفوق ذلك فإن مقادير الإحداثيات لا تحدد عملياً بطريق القياس المباشر بقضبان القياس فقط ولكن بطرق غير مباشرة أيضاً ، فإذا كنا نريد أن تحتفظ النتائج التي توصلنا إليها في الفيزياء والفلك بوضوحها يجب أن لا يغيب عن بالنا أن تعيين المواقع يفقد معناه الفيزيائي ما لم يخضع للاعتبارات التي ذكرناها آنفاً^(١) .

وهكذا نصل إلى النتيجة التالية : إن وصف الحوادث التي تتم في الفضاء يحتم علينا الالتجاء إلى مجموعة إسناد جاسئة ننسب إليها هذه الحوادث ، والعلاقة الناتجة تسلم جدلاً بأن قوانين الهندسة الإقليدية تنطبق على المسافات باعتبار المسافة يمثلها فيزيائياً اتفاق سابق على علامتين على جسم جاسيء .

(١) لا يصح اكمال وتخوير هذا الاعتبار ضرورياً إلى أن نعالج نظرية النسبية العامة التي سنناقشها في الجزء الثاني من هذا الكتاب .

الفصل الثالث

المكان والزمان فى الميكانيكا الكلاسيكية

«إن الميكانيكا تهدف إلى وصف كيفية تغيير الأجسام لمواقعها فى المكان بمرور الزمن». لأشك أنى لو ألقىيت مثل هذا القول على علاته دون تفكير جدى وإيضاحات مفصلة عن أهداف الميكانيكا أكون قد أثقلت ضميرى بأثام جسام ضد روح البوضوح المقدسة .

والآن دعنا نكشف الغطاء عن هذه الآثام وأولها هو عدم وضوح ما نقصده هنا بكلمتى «الموقع» و«المكان» . فإذا فرضنا أنى أقف بنافلة عربية قطار يسير بسرعة انتقال منتظمة وأنى أسقطت حجراً على طريق السكة الحديدية دون أن أقذف به فإنى إذا تفاضيت عن أثر مقاومة الهواء أجد أن هذا الحجر يظهر بالنسبة لى كأنه يسقط فى خط مستقيم بينما يراه رجل واقف على جانب الطريق يسقط إلى الأرض فى منحنى يسمى قطع مكافئ . وإنى أنساءل الآن هل تقع النقط التى مر بها الحجر « فى الحقيقة » على خط مستقيم أو على منحنى قطع مكافئ ؟ وفوق ذلك ماذا نقصد هنا بعبارة الحركة «فى المكان» ... ؟ إننا فى ضوء الاعتبارات التى قدمناها فى الفصل السابق نجد أن الجواب على هذا السؤال واضح

للعيان والسبيل إليه هو أن نحذف أولاً وقبل كل شيء تلك الكلمة الغامضة «المكان» التى تقتضى الأمانة أن نعتزف بأننا لا نستطيع أن نكون عنها أدنى فكرة ، ثم نحل محلها عبارة «الحركة بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاسئة» . أما المواقع بالنسبة إلى مجموعة الإسناد (عربة القطار أو قضيب السكة الحديدية) فقد سبق لنا تعريفها تفصيلاً فى الفصل السابق فإذا وضعنا بدلاً من عبارة «مجموعة الإسناد» عبارة «مجموعة الإحداثيات» وهى فكرة رائعة يمكن الاعتماد عليها فى الوصف الرياضى - نجد أننا قد أصبحنا فى موقف يؤهلنا لأن نقول : «إن الحجر يقطع عند سقوطه خطأ مستقيماً بالنسبة إلى مجموعة إسناد مرتبطة ارتباطاً جاسئاً بعربة القطار ولكنه بالنسبة إلى مجموعة إسناد مرتبطة ارتباطاً جاسئاً بالأرض قضيب السكة الحديدية) يقطع قطعاً مكافئاً» ونحن نرى بوضوح بفضل هذا المثل أنه لا وجود لشيء مثل «مسار مستقل الوجود» (حرفياً منحنى المسار^(١)) إنما كل ما هناك هو مجرد مسار نسبي بالنسبة إلى مجموعة إسناد خاصة .

ولكى يكون وصفنا للحركة كاملاً يجب أن نعين كيف يغير الجسم موقعة بمرور الزمن . أى أننا يجب أن نذكر بالنسبة إلى كل نقطة على المسار وقت وجود الجسم بهذه النقطة . وحتى هذه المدلولات لا تكفى لأن تجعل وصفنا للحركة كاملاً إنما يجب أن يضاف إليها تعريف للزمن يجعل من المستطاع اعتبارها - وهى قيم زمانية أصلاً - مقادير (نتائج

(١) أى المنحنى الذى يتحرك عليه الجسم .

للقياس) يمكن معرفتها عن طريق الملاحظة وفى حالة المثل التوضيحي السابق نصل إلى تحقيق هذا الهدف - على أساس الميكانيكا الكلاسيكية - بأن نتصور أن هناك ساعتين متشابهتين فى التركيب إحداهما مع الراصد الذى يطل من نافذة القطار والأخرى مع الراصد الذى على جانب الطريق الحديدى وأن نطلب إليهما أن يحدد كل منهما موضع الحجر بالنسبة إلى مجموعة إسناد كل منهما فى كل لحظة تعينها الساعة . ونحن نتجاوز فى هذا عن الخطأ الذى يترتب على سرعة انتشار الضوء المحددة . وستكلم بالتفصيل عن ذلك وعن صعوبة أخرى قائمة هنا فى فصول تالية .

الفصل الرابع

مجموعة الإحداثيات الجليلية

كلنا نعلم جيداً أننا نستطيع لو شئنا أن نضع القانون الأساسى لميكانيكا جاليليو - نيوتن وهو المعروف بقانون القصور الذاتى على النحو الآتى : « كل جسم معزول بدرجة كافية عن بقية الأجسام يستمر ساكناً أو متحركاً بحركة منتظمة فى خط مستقيم » . وهذا القانون لا يدلنا إلى حد ما على حركة الأجسام فحسب بل إنه يشير أيضاً إلى مجموعات الإسناد أو مجموعات الإحداثيات الممكنة فى الميكانيكا التى يمكن الالتجاء إليها عند الوصف الميكانيكى . فالنجوم الثابتة التى يمكن رؤيتها أجسام معزولة بدرجة كافية ، ويمكن أن يطبق عليها قانون القصور الذاتى إلى درجة عالية من التقريب . ولكننا إذا استعملنا مجموعة إحداثيات مرتبطة بالأرض ارتباطاً جاسئاً نجد أن كل نجم ثابت يتحرك بالنسبة إلى هذه المجموعات فى دائرة هائلة القطر خلال يوم فلكى وهذا يجعل هذه المجموعات تتعارض مع نص قانون القصور الذاتى ولذلك إذا أردنا التمسك بهذا القانون وجب علينا قصر إسناد الحركات عموماً على مجموعات الإحداثيات التى تكون حالتها من الحركة بحيث ينطبق عليها

قانون القصور الذاتى وتسمى «مجموعة إحدائيات جاليلية» ولا تعتبر
قوانين ميكانيكا جاليليو - نيوتن صحيحة إلا بالنسبة إلى مجموعات
الإحدائيات الجاليلية هذه فقط .

الفصل الخامس

مبدأ النسبية (بالمعنى المقيد)

د

دعنا نعود تلمساً لأقصى وضوح ممكن إلى مثل عربة القطار التي تتحرك بسرعة منتظمة . إننا نسمى حركتها انتقالاً منتظماً (منتظماً لأن سرعته واتجاهه ثابتان وانتقالاً لأنه بالرغم من أن العربة تغير موضعها بالنسبة إلى قضيب السكة الحديدية فإنها مع ذلك لا تدور أثناء حركتها) ولنفرض الآن أن غراباً يطير بحيث تبدو حركته لمن يرقبها من فوق قضيب السكة الحديدية منتظمة وفي خط مستقيم . إننا إذاً كان علينا أن نرصد نفس الغراب الطائر ونراقبه من عربة القطار المتحركة لوجدنا أن حركته سوف تبدو مختلفة السرعة والاتجاه عنها في الحالة الأولى ولكنها ستظل مع ذلك منتظمة وفي خط مستقيم . ولهذا يمكن أن نقول على وجه التجريد «إذا كانت الكتلة ك تتحرك بانتظام في خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م فإنها تكون أيضاً متحركة بحركة منتظمة وفي خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة إسناد أخرى م مادامت مجموعة الإسناد الأخيرة تتحرك بحركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م » وتبعاً لما ذكرنا في الفصل السابق ترى أنه :

إذا كانت م مجموعة إسناد جاليلية فإن كل مجموعة إسناد أخرى م تكون جاليلية أيضاً عندما تكون فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م فتكون قوانين ميكانيكا جاليليو - نيوتن صحيحة بالنسبة إلى المجموعة م مثل ما هى صحيحة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م .

والآن دعنا نتقدم خطوة أخرى فى تعميمنا فنعبر عن المبدأ على هذا النحو : « إذا كانت م مجموعة إسناد تتحرك بحركة منتظمة خالية من الدوران بالنسبة إلى م فإن كل الظواهر الطبيعية بالنسبة إلى م تخضع لنفس القوانين الطبيعية العامة التى تخضع لها فى م » ويسمى هذا النص «مبدأ النسبية» (بالمعنى المقيد) .

وعندما كنا مقتنعين بأن كل الظواهر الطبيعية يمكن تمثيلها بمساعدة قوانين الميكانيكا الكلاسيكية لم يكن هناك داع إلى الشك فى صحة مبدأ النسبية ، ولكنه ظهر شيئاً فشيئاً مع تقدم الديناميكا الكهربائية وعلم البصريات أن الميكانيكا الكلاسيكية لم تعد تقدم أساساً كافياً لوصف كل الظواهر الطبيعية ، وعند ذلك قفز السؤال عن صلاحية مبدأ النسبية وصحته إلى مسرح المناقشة ، ولم يستبعد فى ذلك الحين أن تكون الإجابة عليه بالنفى .

ومع ذلك فهناك حقيقتان عامتان ضخمتان تؤيدان تأييداً واضحاً صدق مبدأ النسبية . فالميكانيكا الكلاسيكية بالرغم من أنها أصبحت لا تمدنا بأساس شامل يكفى لأن يفسر نظرياً كل الظواهر الطبيعية فإننا لا

نستطيع أن ننكر عليها قدراً عظيماً من «الصدق» حيث إنها تفسر لنا تفسيراً يبلغ حد الروعة في دقته حركات الأجرام السماوية وعلى ذلك يجب أن يصدق مبدأ النسبية بدقة عظيمة في مجال الميكانيكا أيضاً . أما أن يصدق بهذه الدقة العظيمة مبدأ عام كهذا في مجال من مجالات الظواهر وأن يكبو في غيرهم فأمر يكاد يكون بديهاً أنه غير محتمل .

أما الحجة الأخرى ولو أننا سنعود إليها فيما بعد فتتلخص في أنه إذا كان مبدأ النسبية (بالمعنى المقيد) خطأ فإن مجموعات الإسناد الجاليلية م ، م ، م ... إلخ التي تتحرك بحركة منتظمة بالنسبة لبعضها البعض لن تكون متكافئة من حيث ملأمتها لوصف الظواهر الطبيعية وفي هذه الحالة سنجد أنفسنا محمولين على الاعتقاد بأن القوانين الطبيعية لا يمكن التعبير عنها بطريقة سهلة إلا في حالة خاصة واحدة وذلك عندما نكون قد اخترنا كمجموعة إسناد لنا من بين كل مجموعات الإحداثيات الجاليلية مجموعة واحدة م لها حالة خاصة من الحركة ، وسيحق لنا عندئذ (وذلك بسبب مزايا هذه المجموعة من حيث الملائمة في وصف الظواهر الطبيعية) أن نسمي هذه المجموعة م في حالة «سكون مطلق» وكل المجموعات الجاليلية الأخرى م حالة «حركة» . فإذا كان طريق السكة الحديدية مثلاً يناظر المجموعة م فإن عربة القطار تناظر المجموعة م وتكون القوانين الخاصة بالمجموعة الأولى م أبسط من قوانين المجموعة الثانية م . وهذا التعقيد في قوانين المجموعة الثانية مرجعه أن العربة تتحرك « في الحقيقة

بالنسبة إلى م وسي تدخل مقدار واتجاه سرعة العربة في تحديد القوانين الطبيعية العامة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م . لذلك كان علينا أن نتوقع مثلاً أن تختلف نغمة صادرة عن أنبوبة أرغن محورها في اتجاه حركة العربة عن نغمة صادرة من نفس أنبوبة الأرغن عندما يكون محورها في اتجاه عمودي على اتجاه حركة العربة . ولما كانت الأرض بسبب حركتها في مدارها حول الشمس تشبه عربة قطار تتحرك بسرعة ٣٠ ك م في الثانية فعلياً إذا أن نتوقع إذا كان مبدأ النسبية غير صحيح أن يتدخل اتجاه حركة الأرض في تكييف القوانين الطبيعية ، وكذلك سوف يعتمد سلوك المجموعات الفيزيائية على اتجاهها في الفضاء بالنسبة للأرض لأنه لما كان اتجاه سرعة الأرض في دورانها يتغير خلال العام فإنها لا يمكن أن تكون في حالة سكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م خلال العام كله . ولكنه لم يحدث أبداً أن كشفت الملاحظة الدقيقة عن أى تأثير أو تدخل للاتجاهات في تحديد القوانين الطبيعية في الفضاء الأرضي ، أى أننا لم نجد أى اختلاف أو فارق بين خواص الاتجاهات المختلفة في الفضاء لأنها كلها متكافئة وهذا تأييد قوى لمبدأ النسبية .

الفصل السادس

نظرية تركيب السرعات المستعملة

فى الميكانيكا الكلاسيكية

تخيل أيها القارئ العزيز عربة القطار تتحرك على القضبان بسرعة قدرها c وتخيل رجلاً يعبر العربة طولاً فى اتجاه سير القطار بسرعة قدرها c' فبأية سرعة يتحرك هذا الرجل بالنسبة إلى قضبان السكة الحديدية ؟ إذا ظل الرجل ساكناً فى العربة مدة ثانية فإنه يقطع فى هذه الثانية مسافة قدرها c مساوية عددياً لسرعة العربة ولكنه فى الواقع نظراً لسيّره فى العربة يقطع فى هذه الثانية مسافة إضافية قدرها c' بالنسبة للعربة وبالتالي بالنسبة للقضبان أيضاً وتساوى عددياً سرعة سيّره . وهكذا يكون مجموع ما يقطعه فى الثانية بالنسبة إلى القضبان هو $s = c + c'$ وسنرى فيما يلى أن هذه النظرية وتسمى فى الميكانيكا الكلاسيكية نظرية تركيب السرعات لا يمكن الاحتفاظ بها ، أى أن القانون الذى ذكرناه آنفاً لا يمثل الحقيقة ولو أننا سنسلم الآن بصحته إلى حين .

الفصل السابع

التناقض الظاهري

بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية

يصعب أن نجد في الفيزياء قانوناً أبسط من قانون انتشار الضوء في الفراغ ؛ فكل أطفال المدارس يعرفون أو يظنون أنهم يعرفون أن هذا الانتشار يحدث في خط مستقيم بسرعة قدرها $300,000$ كم في الثانية . ونحن نعرف على أية حال بمنتهى الدقة أن هذه السرعة واحدة بالنسبة لكل الألوان ، لأنه لو لم يكن الأمر كذلك لما استطعنا رؤية أقل ومضة من نجم ثابت بالنسبة للألوان المختلفة متزامنة وذلك أثناء كسوف ذلك النجم بواسطة جاره المظلم . ولقد استطاع الفلكي الهولندي دي ستر استناداً إلى اعتبارات مماثلة قائمة على دراسة النجوم المزدوجة أن يثبت أيضاً أن سرعة انتقال الضوء لا تتأثر بحركة المصدر الذي يصدر منه والزعم ، القائل بأن سرعة انتشار الضوء تعتمد على اتجاهه « في الفضاء » زعم في حد ذاته غير محتمل .

إننا باختصار مدعوون إلى أن نسلم مع أطفال المدارس بقانون ثبوت سرعة انتشار الضوء (في الفراغ) جـ . من كان يتخيل أن هذا القانون

البيسط قد أوقع علماء الفيزياء أمناء التفكير فى أكبر المآزق الفكرية !...
دعنا نرى الآن كيف كان ذلك .

إننا نعلم جميعاً أنه يجب علينا أن نسد عملية انتشار الضوء
(وكذلك كل عملية أخرى فى الواقع) إلى مجموعة إسناد جاسئة (مجموعة
إحداثيات) وليكن طريق السكة الحديدية الذى يمكن أن نتصوره فى فراغ
تام فإذا أرسلنا شعاعاً ضوئياً على طول الطريق فإن رأس هذا الشعاع
يتحرك بالسرعة c بالنسبة للطريق ولكننا إذا تخيلنا عربة القطار تسير
بسرعة ثابتة على الطريق قدرها v فى نفس اتجاه شعاع الضوء فماذا تكون
سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى عربة القطار ؟ ... من الواضح أننا
نستطيع هنا أن نطبق النظرية التى شرحناها فى الفصل السابق حيث
يلعب شعاع الضوء دور الرجل بالنسبة إلى عربة القطار ونستبدل السرعة c
وهى سرعة الرجل بالنسبة إلى الطريق بسرعة الضوء بالنسبة إلى الطريقة
وتكون s هى السرعة المطلوبة وهى سرعة الضوء بالنسبة إلى العربة
وعلى ذلك يكون لدينا :

$$s = c - v$$

وهكذا يكون انتشار الضوء بالنسبة للعربة أقل من c

ولكن هذه النتيجة تناقض مبدأ النسبية الذى أوضحناه فى الفصل
الخامس والذى ينص على أن قانون انتشار الضوء فى الفراغ ككل قانون
طبيعى آخر يجب أن يظل واحداً سواء كانت مجموعة الإسناد هى طريق

السكة الحديدية أو العربة . ولقد رأينا أن هذا يبدو مستحيلا فى ضوء ما تقدم لأنه إذا كانت سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية هى حـ فإنه تبعاً لما تقدم يجب أن يكون هناك قانون آخر لسرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى العربة وهذه هى نقطة الخلاف مع مبدأ النسبية .

وأمام هذه المشكلة لم يكن هناك بد من الاستغناء عن واحد منهما : مبدأ النسبية أو قانون انتشار الضوء فى الفراغ والقراء الذين تتبعوا جيداً الفصول السابقة يتوقعون بالتأكيد أننا سنقف فى صف النسبية وذلك لأنه شديد الإقناع ، غاية فى البساطة وطبيعى جداً وفى هذه الحالة يجب استبدال قانون انتشار الضوء فى الفراغ بقانون آخر أكثر تعقيداً ولكنه يتفق ومبدأ النسبية . ولكن تقدم الفيزياء النظرية قد أوضح بجلاء أن هذا التعديل أمر غير مستطاع فقد أثبتت الأبحاث النظرية التى كان لها أثر بالغ والتى أجراها هـ. أ. لورنتز على الظواهر الديناميكية الكهربائية والظواهر الضوئية المتعلقة بالأجسام المتحركة أن التجربة فى هذا المضمـار تؤيد تماماً تفسيراً للظواهر الكهرومغناطيسية يستلزم الاحتفاظ بقانون ثبوت سرعة الضوء فى الفراغ . وهنا احتدام الصراع بين الرايين . وقد مال فزيائيون كبار عندما وصلنا إلى هذا الوضع إلى التخلّى عن مبدأ النسبية بالرغم من أن أحداً لم يتوصل بأية حال من الأحوال إلى نتائج تجريبية تتعارض مع هذا المبدأ .

وفى هذه الأزمة المستحكمة تقدمت نظرية النسبية إلى الحلبة وأدلت

بدلوها وبدا واضحاً عند ذلك تمام الوضوح نتيجة لتحليل تصورات الفيزياء عن المكان والزمان أنه « لا أثر في الحقيقة لأى تعارض بين مبدأ النسبية وقانون انتشار الضوء » . وإنما بالتمسك بانتظام بكلا هذين القانونين نستطيع الوصول إلى نظرية متماسكة منطقياً . ولقد سميت هذه النظرية بنظرية النسبية الخاصة تمييزاً لها عن النظرية الأوسع التى سنعالجها فى آخر هذا الكتاب . أما فى الصفحات التالية فسندعم الأفكار الأساسية فى نظرية النسبية الخاصة .

الفصل الثامن

فكرة الزمن فى الفيزياء

هـب أن صاعقتين جويتين أصابتا قضبان السكة الحديدية المعهودة فى مكانين ١ ، ب متباعدين جداً . وهب فوق ذلك أنى أكدت لك أن هاتين الصاعقتين قد حدثتا فى وقت واحد . إنى لو سألتك أيها القارئ العزيز هل هناك أى معنى لهذا القول ؟ لأجبت على الفور بالإيجاب . ولكنى لو طالبتك بأن تشرح لى بإسهاب ودقة معنى هذا الكلام لوجدت بعد قليل من التأمل أن الأمر ليس هيناً كما يبدو لأول وهلة .

وربما خطرت لك بعد قليل هذه الإجابة : «إن معنى هذا الكلام واضح لا يحتاج إلى تفسير وطبيعى أن الأمر سيحتاج إلى بعض التدبر لو كان على أن أقرر عن طريق الملاحظة ما إذا كانت الصاعقتان فى هذه الحالة قد حدثتا فى آن واحد أم لا » . ولكنى شخصياً لا يمكن أن أَرْضَى بهذه الإجابة للسبب التالى : هـب أن فلكياً ماهراً استطاع أن يكتشف خلال تأملاته العبقرية أن الصاعقة لابد أن تصيب ١ ، ب فى وقت واحد ، فعند ذلك سيكون علينا أن نختبر إذا كانت هذه النتيجة النظرية

تتفق والحقيقة ، وعند ذلك ستجابهنا نفس الصعوبة التى تقابلنا فى كل أمور الفيزياء التى تتدخل ، وعند ذلك ستجابهنا نفس الصعوبة التى تقابلنا فى كل أمور الفيزياء التى تتدخل فيها فكرة الآنية أو التزامن . إن هذا التصور لا وجود لها بالنسبة إلى عالم الفيزياء ما لم تتح له فرصة اكتشاف ما إذا كان قد تحقق فعلا أم لا . وهكذا نرى أننا فى احتياج إلى تعريف الآنية وتحديد معناها تعريفاً يمدنا بوسيلة نستطيع بها فى الحالة الراهنة أن نقرر تجريبياً هل حدثت الصاعقتان الجويتان فعلاً فى وقت واحد أم لا . وطالما لم يتوافر هذا الشرط ولم يحقق هذه النتيجة فإننى أنا عالم الفيزياء (وبالطبع أيضاً إن لم أكن عالم فيزياء) أخضع نفسى حينما أتصور أننى أستطيع أن أعطى النص على الآنية أى معنى (فشرط التسليم بوجود الآنية هو إمكان التحقق منها عملياً وإلا فليس هناك آنية)^(١) وإنسى أسأل القارئ ألا يتابع القراءة ما لم يكن تام الاقتناع بهذه النقطة .

وربما بعد أن تأملت الأمر ملياً خطرت لك الفكرة التالية كوسيلة عملية للتحقق من الآنية ألا وهى أن نقيس المسافة بين أ ، ب وأن نضع راصداً فى نقطة الوسط (و) مزوداً بوسيلة ما (مرآتين متعامدتين مثلاً) تمكنه من رؤية أ ، ب معاً . فإذا رأى مثل هذا الراصد الصاعقتين فى وقت واحد فهما إذا آتيتان .

(١) لم ترد هذه العبارة فى الأصل أضفناها للشرح (المترجم) .

ويسرنى جداً أن أوافق على هذا الرأي ولو أنه فى نظرى لا يحسم الموضوع فإنى أشعر أنى ملزم أن أقدم الاعتراض التالى : إن هذا التعريف للآنية صحيح لاشك فى ذلك لو أنى كنت أعلم أن الضوء الذى يرى به الراصد وميض الصاعقة يقطع المسافة (أ و) بنفس السرعة التى تقطع بها المسافة (ب و) ولا نستطيع اختبار صحة هذا الفرض ما لم يكن لدينا وسيلة لقياس الزمن . وهكذا يبدو أننا ندور فى حلقة مفرغة .

وربما بعد تأمل قليل أجبت ساخراً منى ولديك كل العذر قائلاً : إننى متمسك بتعريفى السابق للآنية رغم اعتراضك لأن هذا التعريف لا يتعرض فى الواقع للضوء إطلاقاً ، وليس هناك إلا شرط واحد يجب أن يتوافر فى تعريف الآنية لكى يكون صحيحاً ألا وهو أنه فى كل حالة واقعية يجب أن يمكننا هذا التعريف من أن نقرر تجريبياً إذا ما كانت الحالة التى نحن بصدددها قد تحققت فعلاً أم لم تتحقق . وليس هناك مجال للمناقشة فى أن التعريف الذى أقدمه للآنية لاشك يحقق هذا الشرط فكون الضوء يحتاج إلى نفس الزمن لقطع المسافة من (و) إلى (ب) ليس فى الحقيقة تخيلاً أو افتراضاً حول طبيعة الزمن الفيزيائية ولكنه مجرد « تعويض » لى مطلق الحرية فى إجراءاته لكى أصل إلى تعريف الآنية .

وواضح ان هذا التعريف يحسن ان يستعمل ليعطى معنى محددا لا
لحادثين فقط بل ولأى عدد نختاره من الحوادث أيا كانت مواضع مسارح
هذه الحوادث بالنسبة إلى مجموعة الإسناد^(١) (وهي هنا طريق السكة
الحديدية) وهذا يقودنا أيضا إلى تعريف الزمن في الفيزياء . ولهذا دعنا
نتصور ساعات متماثلة التركيب وضعت في النقط أ ، ب ، ح من
طريق السكة الحديدية (مجموعة إحداثيات) بحيث تكون عقاربها في آن
واحد بالمعنى السابق في مواضع متماثلة . وفي هذه الظروف نرى أن زمن
آية حادثة هو ما تحدده قراءة موضع عقارب آية ساعة من الساعات التي
على مقربة من مكان الحادثة . وبهذه الطريقة نجتمع بين كل حادثة يمكن
رصدها ومقدار زمني بصورة أساسية .

وهذا التعويض يحمل في طياته فرضاً فزيائياً آخر مسلماً به يصعب
الشك في صحته ما لم يثبت تجريبياً أن العكس هو الصحيح ذلك هو
افتراضنا أن جميع هذه الساعات تتحرك بمعدل واحد مادامت متشابهة
التركيب أو بعبارة أدق إذا ضبطت ساعتان في حالة سكون وفي مكانين

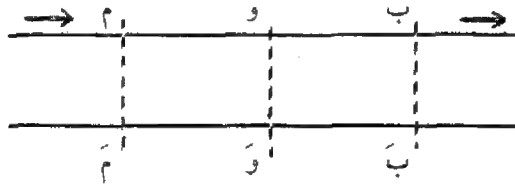
(١) ونحن نفرض أبعد من ذلك أنه عندما تحدث الحوادث أ ، ب ، ج في أماكن
مختلفة بحيث تكون آية مع ب ، ب آية مع ج « آية بالمعنى المذكور آنفاً » يكون
شروط آية الحادثين أ ، ج قد تحقق أيضا . وهذا الزعم فرض فيزيائي حول قانون
انتشار الضوء ولا بد من تحقيقه إذا كنا نريد الاحتفاظ بقانون ثبوت سرعة الضوء في
الفراغ .

مختلفين من مجموعة إسناد بحيث يكون موضعاً «خاصاً» لعقري إحدى الساعتين « آتياً » (بالمعنى السابق) مع «نفس» موضع عقري الساعة الأخرى تكون « القراءات » «المتماثلة» للساعتين آتية دائماً (بمعنى التعريف السابق للآتية) .

الفصل التاسع

نسبية الآنية

لقد درجنا حتى الآن على إتخاذ طريق السكة الحديدية مجموعة إسناد لنا ولا بأس أن نفرض أن قطاراً طويلاً جداً يتحرك على القضبان بسرعة قدرها c في الاتجاه الموضح بالشكل (أ) سيفضل المسافرون بهذا القطار إتخاذهم مجموعة إسناد (مجموعة إحداثيات) وسيسندون كل ما يحدث إليه وعلى ذلك فكل حادثة تحدث على طول الطريق تحدث أيضاً عند نقطة



(شكل ١)

خاصة من القطار كذلك . ويمكن أيضاً أن نحدد الآنية بالنسبة إلى القطار بنفس الطريقة التي نحددها بها بالنسبة إلى طريقة السكة الحديدية .
ويجابهنا السؤال التالي نتيجة طبيعية لما تقدم :

هل تكون الحادثنان الآتيتان بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية

(مثل الصاعقتين أ ، ب) آتيتن أيضاً بالنسبة إلى القطار ؟ وسنوضح مباشرة فيمايلي أن الإجابة على هذا السؤال يجب أن تكون بالنفى .

إننا حينما نقول إن الصاعقتين أ ، ب آتيتان بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية نعني أن أشعة الضوء الصادرة من المكانين أ ، ب حيث تحدث الصاعقتان تتقابل في النقطة (و) (وهي منتصف المسافة أ ، ب على الطريق) ويناظر الحادثتان أيضاً على طريق السكة الحديدية الموضعين أ ، ب على القطار ولنفرض أن النقطة (و) هي نفس نقطة الوسط للمسافة أ ب على القطار فإنه عندما يحدث وميض البرق^(١) تتفق النقطة (و) مع النقطة (و) لكنها كما في الرسم التوضيحي تتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها ع هي سرعة القطار فإذا كان هناك راصد يجلس في (و) في القطار ولا يتحرك بالسرعة ع فإنه سيظل دائماً في (و) وسيصل إليه شعاعا الضوء الصادران من أ ، ب في نفس الوقت حيث يلتقيان عند مكان جلوسه ولكنه في الواقع (بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية) يندفع في اتجاه شعاع الضوء الآتي من ب بينما يبتعد عن الشعاع الآتي من أ وعلى ذلك سيرى الراصد الشعاع الآتي من ب قبل أن يرى الشعاع الآتي من أ وعلى ذلك نصل إلى النتيجة المهمة التالية :

(١) كما يظهر من طريق السكة الحديدية .

إن الحوادث الانية بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ليست آنية بالنسبة إلى القطار والعكس بالعكس (نسبية الآنية) فلكل مجموعة إسناد (مجموعة إحدائيات) زمنها الخاص . وما لم نعين مجموعة الإسناد التي حددنا بالنسبة لها زمن أية حادثة فليس هناك أى معنى لهذا التحديد .

وقبل ظهور نظرية النسبية كانت الفيزياء تسلم تسليمًا أعمى بأن الزمن أمر مطلق أى أنه مستقل عن حالة الحركة أو السكون التي عليها مجموعة الإسناد . ولقد رأينا الآن أن هذا الزعم لا يتفق مع تصور الآنية الطبيعي جداً وإذا أسقطناه اختفى التناقض الظاهري بين قانون انتشار الضوء فى الفراغ ومبدأ النسبية (كما أوضحنا فى الفصل السابع) .

ولقد أوقعتنا الاعتبارات التي استعرضناها فى الفصل الثالث (وهي اعتبارات بالية لا يمكن التمسك بها) فى هذا التناقض ؛ فقد ذكرنا فى ذلك الفصل أن الرجل الذى يقطع وهو فى العربة المسافة ف بالنسبة للعربة يقطع نفس المسافة فى نفس المدة بالنسبة إلى قضيب السكة الحديدية . وما نحن نرى فى ضوء ما ذكر فى الفصل الحالى أن الزمن الذى تستغرقه حادثة ما بالنسبة إلى عربة القطار لا يجوز أن يعتبر مساوياً للزمن الذى تستغرقه نفس الحادثة بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ،

وعلى ذلك لا يمكن ان يوافق على ان الرجل حينما يمشى في العريه
ويقطع بالنسبة لها المسافة ف « في الثانية » يقطع نفس المسافة في زمن
مساو بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية .

وفوق ذلك فإن اعتبارات الفصل السادس تعتمد على زعم آخر يبدو
عند التحليل الدقيق حكماً تعسفياً ولو أننا كنا نلجأ إليه ضمناً بصورة
مستمرة حتى قبل مجيء نظرية النسبية .

الفصل العاشر

حول نسبية تصور المسافة

دعنا نتخيل نقطتين معينتين على القطار (مثل منتصف العرببة الأولى ومنتصف العرببة العشرين) الذى يتحرك على قضيب السكة الحديدية بسرعة ع . ودعنا نبحث عن المسافة التى تفصلهما . إننا نعلم مقدماً أنه يجب علينا أن نحصل على مجموعة إسناد نقيس المسافات بالنسبة إليها . وأبسط الأمور هو أن نعتبر القطار نفسه مجموعة الإسناد (مجموعة إحداثيات) والمسافر فى القطار يستطيع أن يقيس المسافة باستعمال قضيب القياس فى خط مستقيم (أى بتطبيقه على أرضية العربات العدد الكافى من المرات للوصول من النقطة الأولى إلى الثانية) ويحدد العدد الدال على عدد مرات تطبيق قضيب القياس طول المسافة المطلوبة .

ولكن الأمر يختلف عن ذلك إذا أردنا قياس هذه المسافة بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ويبدو هنا أن الطريقة المثالية لذلك هى : إذا سمينا أ ، ب النقطتين اللتين على القطار الذى يتحرك بالسرعة ع واللتين يراد إيجاد المسافة التى تفصل بينهما فإن هاتين النقطتين تتحركان على طول

الطريق بالسرعة ع أيضا ونحن نحتاج أولا إلى أن نعين النقطتين أ ، ب على طريق السكة الحديدية التي مرت عليهما النقطتان أ ، ب على القطار في زمن معين ز بالنسبة إلى الطريق . وهاتان النقطتان (أ ، ب) على الطريق الحديدى يمكن تحديدهما تبعاً لتعريف الزمن الذى قدمناه فى الفصل الثامن والمسافة بين هاتين النقطتين (أ ، ب) يمكن أن تقاس إذا بتكرار عملية تطبيق قضيب القياس على طول الطريق .

وليس هناك أى سبب أولى لأن نؤكد أن عملية القياس الأخيرة تتفق فى النتيجة مع عملية القياس الأولى . وهكذا قد يكون طول القطار مقيساً بالنسبة إلى الطريق مختلفاً عن طوله مقيساً بالنسبة إلى القطار نفسه . وهذا الظرف يؤدي بنا إلى إعتراض ثان على آراء الفصل السادس التى تبدو ظاهرياً واضحة ، وهو أنه إذا كان الرجل الذى فى العربة يقطع المسافة ف (مقيسة بالنسبة إلى القطار) فى وحدة الزمن فإن هذه المسافة (مقيسة بالنسبة إلى الطريق) ليست بالضرورة متساوية مع ف .

الفصل الحادى عشر

تحويل لورنتز

إذا استعرضنا نتائج ثلاثة الفصول الأخيرة نرى أن عدم التوافق الظاهرى الذى نجده بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية (الفصل السابع) نشأ عن التسليم فى الميكانيكا الكلاسيكية بفرضين لم يقم عليهما أى دليل . وهذان الفرضان هما :

١ - الفترة الزمانية (الزمن) التى تفصل بين حادثتين مستقلة عن حالة الحركة التى عليها مجموعة الإسناد التى نرجع إليها .

٢ - الفترة المكانية (المسافة) بين نقطتين على جسم جاسىء مستقلة عن حالة الحركة التى عليها مجموعة الإسناد التى نرجع إليها .

فإذا أسقطنا هذين الفرضين اختفت مشكلة الفصل السابع لأن نظرية محصلة السرعات التى استنتجناها فى الفصل السادس تصبح خطأ . وعند ذلك يبدو أن قانون انتشار الضوء فى الفراغ قد يكون متفقاً مع مبدأ النسبية . ويصبح المطلوب معرفته هو كيف يجب تعديل الاعتبارات التى أوضحناها فى الفصل السادس حتى نزيل التناقض الظاهرى بين هاتين النتيجتين التجريبيتين الأساسيتين ؟ وهذا السؤال يقودنا إلى سؤال أعم فقد

كان لدينا فى الفصل السادس أمكنة وأزمنة مسندة إلى كل من القطار والطريق الحديدى فكيف نجد زمن ومكان حادثة بالنسبة إلى القطار إذا كنا نعرف مكانها وزمانها بالنسبة إلى الطريق الحديدى . . ؟ هل من المستطاع الإجابة على هذا السؤال بحيث لا يتعارض قانون انتشار الضوء فى الفراغ مع مبدأ النسبية ؟ أو بعبارة أخرى هل من الممكن إيجاد علاقة بين زمان ومكان الحادثة الواحدة بالنسبة إلى كلتا مجموعتى الإسناد بحيث يكون لكل شعاع من أشعة الضوء السرعة حـ بالنسبة إلى القطار والطريق معاً ؟ إن الإجابة على هذا السؤال هى بالإيجاب وهى إجابة محددة جداً يعبر عنها قانون محدد لتحويل المقادير الزمكانية للحادثة الواحدة تبعاً لتغير مجموعة الإسناد التى تسند إليها .

وقبل أن نتعرض لهذا الموضوع دعنا نقدم له بمايلى :

لقد وجهنا اهتمامنا حتى الآن إلى الحوادث التى تحدث على الطريق الحديدى والتى اعتبرت رياضياً على خط مستقيم وبالطريقة التى أوضحناها فى الفصل الثانى نستطيع أن نتخيل أن هذا المسند إليه مزود جانبياً ورأسياً بهيكل من قضبان القياس المتعامدة بحيث يمكن تحديد مكان أية حادثة بالنسبة إلى هذا الهيكل . وبالمثل فإننا نستطيع أن نتخيل القطار الذى يتحرك بالسرعة ع مستمراً فى كل الفضاء بحيث يمكن تحديد مكان أية حادثة مهما كانت بعيدة بالنسبة لهذا الهيكل الثانى ، ونستطيع دون أن نرتكب أى خطأ أساسى أن نتجاوز عن تداخل هذه الهياكل باستمرار معاً حيث أن الأجسام الجاسئة لا تتداخل فيما بينها .

وفى كل هيكل من هذه الهياكل تتخيل ثلاثة سطوح متعامدة على بعضها البعض تسمى مستويات إحدائية (مجموعة إحدائيات) وعلى ذلك يمثل الطريق الحديدي مجموعة الإحدائيات م وأية حادثة أينما تحدث يمكن تحديد مكانها بالنسبة إلى م بواسطة ثلاثة أعمدة س ، ص ، ش على المستويات الإحدائية وبالنسبة للزمن بالقيمة الزمنية ز أما بالنسبة إلى م فيحدد مكان نفس الحادثة وزمانها القيم س ، ص ، ش ، ز المقابلة وهى تختلف عن س ، ص ، ش ، ز وقد أوضحنا بالتفصيل فيما تقدم كيف يجب أن نعتبر هذه المقادير نتائج للقياس الفيزيائى .

من الواضح أننا نستطيع أن نضع المشكلة على النحو الآتى :

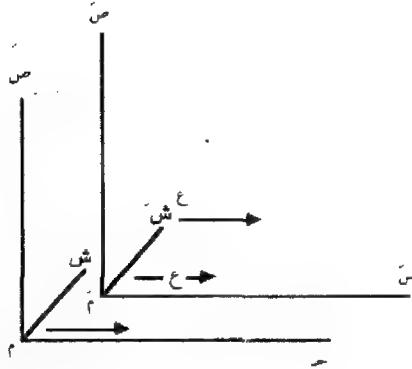
ماهى قيم المقادير س ، ص ، ش ، ز لحادثة ما بالنسبة إلى م إذا كنا نعلم قيم المقادير س ، ص ، ش ، ز لنفس الحادثة بالنسبة إلى م . . . ؟ ويجب أن نختر العلاقات بين هذه القيم بحيث تحترم قانون انتشار الضوء فى الفراغ بالنسبة إلى م ، م وبالرجوع إلى الوضع الموضح فى (الشكل ٢) لمجموع الإحدائيات نجد أن حل المشكلة تقدمه المعادلة :

$$s = \frac{c - z}{\sqrt{\frac{c^2}{c^2} - 1}}$$

$$\bar{v} = v$$

$$\bar{u} = u$$

$$z = \frac{c}{\bar{u}} = \frac{c}{u} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$



(شكل ٢)

وتعرف هذه المجموعة من المعادلات بتحويل لورنتز ولو جعلنا أساساً لنا بدلاً من قانون انتشار الضوء تلك المزايع الضمنية التي كانت تركز إليها الميكانيكا قديماً والتي تركز على فكرة الطابع المطلق للأزمنة والأطوال لحصلنا بدلاً من المعادلات السابقة على المعادلات التالية :

$$س' = س - ع ز$$

$$ص' = ص$$

$$ش' = ش$$

$$ز' = ز$$

وتسمى غالباً هذه المجموعة الأخيرة من المعادلات بتحويل جاليليو. ويمكننا الحصول على تحويل جاليليو من تحويل لورنتز، إذا عوضنا عن سرعة الضوء c في التحويل الأخير (تحويل لورنتز) بكمية متناهية الكبر .

وفيمايلي تستطيع أن ترى فوراً أن قانون انتشار الضوء في الفراغ تبعاً لتحويل لورنتز واحد بالنسبة لكل من مجموعة الإسناد M ومجموعة الإسناد M' . ولذلك نرسل إشارة ضوئية على طول المحور الإيجابي x وهذا المؤثر الضوئي يتقدم تبعاً للمعادلة : $c = z'$

أى بسرعة الضوء c وتبعاً لمعادلات تحويل لورنتز نرى أن هذه العلاقة البسيطة بين x ، z' تعنى علاقة بين x ، z' ونحن في الواقع إذا عوضنا عن x بالمقدار $c z'$ في المعادلة الأولى والمعادلة الرابعة من معادلات تحويل لورنتز حصلنا على :

$$x' = \frac{z' - c t}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{z'^2}}}$$

$$\bar{z} = \frac{z \left(\frac{c}{c'} - 1 \right)}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{c'^2}}}$$

ومنها نحصل بالقسمة على المعادلة :

$$s'' = c' z$$

وإذا أسندنا إلى المجموعة مَ يحدث انتشار الضوء تبعاً لهذه المعادلة .
وهكذا نرى أن سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى المجموعة مَ تساوى أيضاً
حـ ونحصل على نفس النتيجة لأشعة الضوء التي تنتشر فى أى اتجاه
كان . وطبعاً ليس فى هذا أى غرابة حيث إن معادلات تحويل لورنتز قد
اشتقت وفقاً لهذا الرأى .

الفصل الثاني عشر

سلوك الساعات وقضبان القياس المتحركة

هـب أننى أضع قضيباً طوله متر فى اتجاه المحور س لمجموعة الإحداثيات م بحيث يتفق أحد طرفيه (البداية) مع نقطة الصفر بينما يتفق الطرف الثانى (النهاية) مع النقطة س = ١ فما طول هذا القضيب بالنسبة إلى م ؟ وحتى نحصل على ذلك ما علينا إلا أن نبحث أين يقع مبدأ القضيب ونهايته بالنسبة إلى م عند الزمن ز الخاص بالمجموعة م وبوساطة المعادلة الأولى من تحويل لورنتز نجد أن قيمة هاتين النقطتين عند الزمن ز = صفر يمكن إثبات أنها :

$$\text{س (ابتداء القضيب)} = \text{صفر} - ١ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \text{صفر}$$

$$\text{س (نهاية القضيب)} = ١ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{v^2}{c^2}$$

وتكون المسافة بين النقطتين هى $1 - \frac{v^2}{c^2}$ ولكن قضيب القياس

يتحرك بالسرعة ع بالنسبة إلى م وعلى ذلك نجد أن طول قضيب قياس

جاسيء طولہ متر يتحرك فى اتجاه طولہ بسرعة قدرها ع هو $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ من المتر وهكذا يكون القضييب الجاسيء أقصر فى حالة الحركة منه فى حالة السكون ، وكلما زادت سرعة حركته زاد قصره بحيث إذا بلغت السرعة

$$c = \text{حد يصبح طولہ} \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) = \text{صفر وعند السرعات الأكبر}$$

من حد يصبح الجذر التربيعى خيالياً . ومن هذا نستنتج أن السرعة حد فى نظرية النسبية تلعب دور السرعة القصوى التى لا يمكن أن يبلغها أو يزيد عنها أى جسم حقيقى .

وواضح بالطبع أن هذا المظهر للسرعة حد كسرعة قصوى جاء نتيجة لمعادلات تحويل لورنتز لأنها تصبح لا معنى لها إذا اخترنا قيساً للسرعة أكبر من حد وعلى العكس لو أننا تأملنا قضيب قياس طولہ متر فى حالة سكون وفى المحور (س) بالنسبة إلى م لوجدنا أن طولہ بالنسبة إلى راصد

$$\text{فى م سيكون} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

تأملاتنا . وهذا متفق تماماً مع مبدأ النسبية وهو أساس

وواضح بداهة أن معادلات التحويل تهينى لنا حتما فرصة معرفة الشيء الكثير عن السلوك الفيزيائى لكل من قضبان القياس والساعات لأن المقادير س . ص . ش . ز ليست إلا نتائج قياسات لا أكثر ولا أقل

يمكن الحصول عليها عن طريق قضبان القياس والساعات . ولو أننا جعلنا أساساً لتفكيرنا التحويل الجاليلي لما حصلنا على انكماش القضيبي نتيجة للحركته .

دعنا الآن نتأمل ساعة موضوعة دائماً عند أصل م (س = صفر) ، ز = صفر ، ز = ١ هما دقتان متتاليتان لهذه الساعة والمعادلتان الأولى والرابعة من تحويل لورنتز تعطيانا لهاتين الدقتين :

$$ز = \text{صفر}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma$$

وكما يبدو من م تتحرك الساعة بالسرعة ع وعلى ذلك تكون فترة

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma$$

من الثواني أى زمناً أكثر قليلاً وعلى ذلك تكون الساعة أبطأ في حالة الحركة منها في حالة السكون . وهنا أيضاً تلعب السرعة ح دور السرعة القصوى التي لا يمكن بلوغها .

الفصل الثالث عشر

نظرية محصلة السرعات

تجربة فيزو

إننا فى الحياة العملية لا نحرك الساعات وقضبان القياس إلا بسرعات ضئيلة إذا ما قورنت بسرعة الضوء وعلى ذلك لن نستطيع أن نتحقق من نتائج الفصل السابق عملياً . ومع ذلك لابد أنه قد لفت نظرك غرابة هذه النتائج ولهذا يسرنا أن نستخلص من النظرية تبعاً لما أوضحناه فى الفصل السابق نتيجة قد تم التحقق منها عملياً بصورة شائقة . لقد اشتققنا فى الفصل السادس نظرية محصلة السرعات فى اتجاه واحد على النحو الذى تتبعه الميكانيكا الكلاسيكية ويمكن استنتاج هذه النظرية أيضاً من تحويل جاليليو (الفصل الحادى عشر) فبدلاً من الرجل الذى يمشى فى عربة القطار نتصور نقطة تتحرك بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات م حسب المعادلة :

$$s = c \cdot z$$

وبوساطة المعادلة الأولى والرابعة من تحويل جاليليو يمكننا التعبير عن s ، z بدلالة s ، z عندئذ نحصل على المعادلة $s = (c + v) \cdot z$.

وهذه المعادلة لا تعبر عن شيء سوى قانون حركة النقطة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م (أو الرجل بالنسبة إلى الطريق الحديدية) وسنرمز إلى هذه السرعة بالرمز عـ وحيث أن نحصل كما فى الفصل السادس على :

$$(1) \quad ع = (ع + غ)$$

ولكننا نستطيع أن نجري العملية نفسها على أساس نظرية النسبية عند ذلك يجب علينا أن نعبر عن سـ ، رَ فى المعادلة :

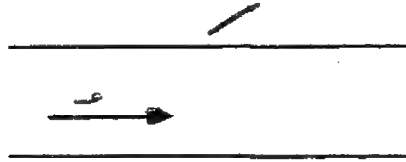
$$س = غَ رَ$$

بدلالة سـ ، ر وباستعمال المعادلتين الأولى والرابعة من تحويل لورنتز نحصل بدلا من المعادلة (1) على المعادلة :

$$(ب) \quad ع = \frac{ع + غ}{1 + \frac{ع غ}{c^2}}$$

وهو ما يناظر محصلة السرعات فى اتجاه واحد تبعاً لنظرية النسبية . والسؤال الذى يجابهنا الآن هو : أى هاتين النظريتين أكثر اتفاقاً مع التجربة . . . ؟ وفى هذا الموقف تسعفنا وتشد أزرنا تجربة على جانب عظيم من الأهمية أجراها الفيزيائى القدير فيزو منذ أكثر من نصف قرن وأعاد إجرائها منذ ذلك الحين عدد من أحسن الفيزيائيين التجريبيين حتى أصبحت نتيجتها لا يتطرق إليها شك على الإطلاق . والتجربة تدور

حول المسألة التالية : إن الضوء يتنقل فى سائل ساكن بالسرعة فبأية سرعة يتنقل فى اتجاه السهم فى الأنبوبة (انظر الشكل ٣) إذا كان السائل المذكور عالية يندفع هو نفسه فى الأنبوبة بالسرعة ع . . . ؟



(شكل ٣)

سيكون علينا تمثيلاً مع مبدأ النسبية أن نسلم بأن انتشار الضوء سيحدث دائماً بنفس السرعة غ بالنسبة للسائل سواء أكان هذا السائل يتحرك بالنسبة للأجسام الأخرى أم لا وهكذا تصبح سرعة الضوء بالنسبة إلى السائل معروفة وسرعة السائل بالنسبة إلى الأنبوبة معروفة أيضاً ونريد معرفة سرعة الضوء بالنسبة إلى الأنبوبة .

وواضح أن المشكلة التى أمامنا الآن هى نفس مشكلة الفصل السادس حيث تلعب الأنبوبة دور الطريق الحديدية أو مجموعة الإسناد . وأخيراً سنجد أن الضوء يلعب دور الرجل الذى كان يمشى بطول العربة . فإذا رمزنا إلى سرعة الضوء بالنسبة إلى الأنبوبة بالرمز ع فإننا يمكن أن نحصل عليها من المعادلتين أ ، ب الأولى باستعمال تحويل جاليليو والثانية باستعمال تحويل لورنتز فأى الجوابين هو الصحيح ؟ ولقد جاءت

التجربة فى جانب المعادلة^(١) المشتقة من نظرية النسبية والاتفاق بينهما تام جداً ، وتبعاً لأدق القياسات التى قام بها زيمان تعبر المعادلة عن تأثير سرعة جريان السائل غ على انتقال الضوء إلى تقرب يقرب من ١ ٪ .

ومع ذلك يجب أن لا يفوتنا الآن التنبيه إلى أن نظرية تفسر هذه الظاهرة كان قد سبق أن قدمها هـ . أ . لورنتز قبل مجيء نظرية النسبية بوقت طويل ، ولكن نظريته وكانت ديناميكية كهربية بحثة فى طبيعتها كسان قد حصل عليها بالالتجاء إلى فروض أخرى حول البناء الكهرومغناطيسى للمادة . وهذا الوضع مع ذلك لا يقلل أبداً من نتيجة التجربة كاختبار مهم يؤيد نظرية النسبية لأن الديناميكا الكهربية التى وضعها ماسكويل لورنتز والتى قامت على أساسها النظرية الأولى لتفسير التجربة لا تتعارض بأى شكل مع نظرية النسبية ، بل إن هذه الأخيرة قد نبعت من الديناميكا الكهربية كنظرية تجمع وتعمم بطريقة مذهلة الافتراضين اللذين بنيت عليهما الديناميكا الكهربية واللذين كانا قبل ذلك مستقلين الواحد عن الآخر .

(١) لقد وجد فيزو أن $c = c + غ$ ($١ + \frac{١}{٧} ن$) حيث $ن = \frac{c}{c}$ وهو معامل انكسار السائل ومن الناحية الأخرى بالنسبة إلى صغر $\frac{c}{c}$ مقارنة بالواحد الصحيح يمكن أن تستبدل (ب) أولاً بالمقدار $c = (c + غ) (١ - \frac{c}{c})$ أو إلى نفس درجة التقريب بالمقدار : $c + غ (١ + \frac{١}{٧} ن)$ وهى تتفق ونتيجة فيزو .

الفصل الرابع عشر

القيمة الكاشفة للنظرية النسبية

نستطيع أن نلخص سلسلة أفكارنا السابقة فيمايلي : لقد أدت بنا التجربة إلى الاقتناع بأمرين : صدق مبدأ النسبية من ناحية وأن سرعة انتقال الضوء فى الفراغ يجب اعتبارها مقداراً ثابتاً من الناحية الأخرى ، وبإتخاذ هذين الفرضين الأساسيين حصلنا على قانون تحويل الإحداثيات المتعامدة س . ص . ش والزمن ز للحوادث - وهى لب جميع العمليات الطبيعية - وفى هذه الحالة لم نحصل على تحويل جاليليو ولكننا حصلنا بخلاف الحال فى الميكانيكا الكلاسيكية على تحويل لورنتز .

ولقد لعب قانون انتشار الضوء وصحته واضحة للعيان دوراً هاماً فى الوصول إلى هذه النتيجة ومادام لدينا تحويل لورنتز فإننا نستطيع أن نجتمع بينه وبين مبدأ النسبية لنحصل على النظرية على النحو التالى :

« يجب أن تكون القوانين الطبيعية العامة بحيث لا تتغير إذا استبدلت المتغيرات س . ص . ش . ز المتعلقة بمجموعة الإحداثيات الأصلية م بالمتغيرات س' . ص' . ش' . ز' الخاصة بمجموعة الإسناد م' وفى هذه الحالة يحدد العلاقة بين المتغيرات الأولى والثانية تحويلات لورنتز أو

أو بعبارة أخرى مختصرة يجب أن تكون القوانين الطبيعية متغيرات متعددة بالنسبة إلى تحويلات لورنتز » .

هذا هو الشرط الرياضى المحدد الذى تستوجهه نظرية النسبية فى أى قانون طبيعى . ولذلك أصبح للنظرية أثر كاشف عميق فى البحث عن القوانين الطبيعية العامة . فإذا وجد أن قانوناً عاماً من قوانين الطبيعة لا يحقق هذا الشرط فعلى الأقل لا بد أن يكون أحد الفرضيين الأساسيين للنظرية خاطئاً . والآن دعنا نرى النتائج العامة التى أدت إليها هذه النظرية .

الفصل الخامس عشر

النتائج العامة للنظرية

اتضح فى سياق ما تقدم أن نظرية النسبية الخاصة قد تبلورت من دراسة الضوء والديناميكا الكهربائية وهى لم تغير النتائج النظرية فى هذين المجالين ولكنها بسّطت إلى حد بعيد البناء النظرى - أى اشتقاق القوانين - والأهم من ذلك بمراحل أنها اختصرت إلى حد بعيد عدد الفروض المستقلة التى كانت تستند إليها وتقوم عليها وجهة النظر السابقة . ولقد جعلت نظرية النسبية الخاصة نظرية ماكسويل لورنتز مرضية بشكل جعل علماء الفيزياء على استعداد لقبولها ولو لم تكن جميع التجارب قد وقفت فى صفها وأيدتها تأييداً كاملاً .

واحتاج الأمر إلى تعديل الميكانيكا الكلاسيكية حتى تتفق مع نظرية النسبية الخاصة . ولم تؤثر هذه التعديلات تأثيراً جوهرياً إلا فى القوانين التى تتعلق بالسرعات الكبيرة أى عندما تقترب سرعة الأجسام المتحركة من سرعة الضوء ح . وليس لدينا مثال لهذه السرعات إلا ما يتعلق بالإلكترونات والأيونات أما بالنسبة للسرعات الأخرى فقد كان الاختلاف بين نتائج قوانين الميكانيكا الكلاسيكية ونتائج نظرية النسبية الخاصة أضال

من أن يظهر عملياً وسوف لا نتعرض لحركة النجوم إلى أن ندرس نظرية النسبية العامة . إن طاقة الحركة لنقطة مادية تتحرك لم يعد يحددها المقدار

المعروف ك $\frac{v^2}{2}$ بل يعبر عنها بالتعبير :

$$\frac{K}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

وهذا المقدار يقترب من مالا نهاية كلما اقتربت السرعة ع من سرعة الضوء ح ، وعلى ذلك يجب أن تظل السرعة دائما أقل من ح مهما كبرت العجلة وإذا وضعنا التعبير عن طاقة الحركة على شكل متسلسلة حصلنا على :

$$K = K_0 + \frac{1}{2} K_0 \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} K_0 \frac{v^4}{c^4} + \dots$$

عندما يكون الحد $\frac{v^2}{c^2}$ صغيراً مقارنة بالواحد الصحيح فإن الثالث من هذه الحدود يكون دائماً صغيراً مقارنة بالحد الثاني ، وهذا الأخير هو الذى يوضع وحده موضع الاعتبار فى الميكانيكا الكلاسيكية . والحد الأول ك K_0 لا يتضمن السرعة وليس هناك محل للنظر إليه الآن إذا كان ما يعيننا هو مسألة كيفية اعتماد طاقة النقطة المادية على السرعة وسنتكلم عن

المعنى الأساسى لذلك الحد فيما بعد .

وأهم النتائج ذات الطابع العام التى أدت إليها نظرية النسبية الخاصة تتعلق بفكرة الكتلة ؛ فقبل مجئ النسبية كانت الفيزياء تسلم بقانونى بقاء لهما أهمية أساسية هما قانون بقاء الطاقة وقانون بقاء الكتلة . وكان هذان القانونان يدوان مستقلين عن بعضهما البعض تماماً . ولكنهما عن طريق نظرية النسبية قد ادمجا فى قانون واحد وسرى فيما يلى باختصار كيف تم هذا التوحيد وأى معنى يحمله ذلك فى طياته .

إن مبدأ النسبية يتطلب أن يكون بقاء الطاقة صحيحاً لا بالنسبة إلى مجموعة الأحداثيات وحدها بل أيضاً إلى كل مجموعة أحداثيات م فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م أو باختصار بالنسبة إلى كل مجموعة إسناد جاليلية . ويتطلب أيضاً وذلك على عكس ما فى الميكانيكا الكلاسيكية أن يكون تحويل لورنتز هو العامل الحاسم فى الانتقال من مجموعة كهذه إلى أخرى .

وبقليل من التأمل البسيط نسبياً نجد أننا نصل إلى النتيجة التالية من هذه المقدمات ، وذلك متفق مع المعادلات الأساسية للديناميكا الكهربائية لماكسويل : إذا امتص جسم يتحرك بسرعة ع مقداراً من الطاقة ق^(١) على شكل إشعاع دون أن يحدث نتيجة لذلك أى تغيير فى سرعته فإن طاقته تزيد نتيجة لذلك بالمقدار :

(١) ق هى الطاقة المستمدة كما تبدو بالنسبة إلى مجموعة اسناد تتحرك مع الجسم .

$$\frac{Q}{\sqrt{\frac{E}{2} - 1}}$$

وبتأمل التعبير الذي قدمناه آنفاً لطاقة الحركة للجسم نجد أن طاقة الحركة المطلوبة للجسم تصبح :

$$\frac{Q}{\sqrt{\frac{E}{2} - 1}} \left[\frac{Q}{2} + K \right]$$

وهكذا تصبح للجسم نفس الطاقة التي لجسم كتلته $\left[\frac{Q}{2} + K \right]$ ويتحرك بالسرعة ع . من هنا يمكن أن نقول : إذا اكتسب جسم قدراً من الطاقة ق فإن كتلته القصورية تزيد بالمقدار $\frac{Q}{2}$ وليست كتلة القصور لجسم ما ثابتة بل تتغير تبعاً لتغير طاقة الجسم . بل يمكن أن نقول أن كتلة قصور مجموعة من الأجسام يمكن أن تعتبر دليلاً على مقدار طاقتها . وعلى ذلك يصبح قانون بقاء كتلة مجموعة ما مطابقاً لقانون بقاء الطاقة للمجموعة نفسها . وهو صحيح مادامت المجموعة لا تمتص ولا تشع أية طاقة . وإذا عبرنا عن الطاقة بالتعبير :

$$\frac{\text{ك ح}^2 + \text{ق}}{\sqrt{\frac{\text{ع}^2}{\text{ح}} - 1}}$$

وجدنا أن الحد ك ح² الذى لفت نظرنا من قبل ليس إلا مقدار الطاقة^(١) التى يملكها الجسم قبل أن يمتص ق .

وليس من المستطاع حالياً المقارنة المباشرة بالتجربة لهذه العلاقة (كان ذلك صحيحاً سنة ١٩٢٠ ولكن انظر التعليق فى آخر هذا الفصل) بالنسبة لأن تغيرات الطاقة ق التى يمكن أن تعرض لها مجموعة ما ليست كبيرة بالحد الكافى لأن تجعل نفسها محسوسة كتغيير فى كتلة قصور المجموعة حيث أن $\frac{\text{ق}}{\text{ح}^2}$ مقدار صغير جداً بالمقارنة بالكتلة ك التى كانت موجودة قبل تغير الطاقة، ولهذا السبب استطاعت الميكانيكا الكلاسيكية بنجاح أن تعتبر قانون بقاء الكتلة قانوناً صحيحاً مستقلاً بذاته .

ودعنى أضيف إلى ما تقدم ملاحظة أخيرة أساسية الجوهر . إن التجاح الذى حققته تفسيرات فرداى - ماكسويل للتأثير الكهرومغناطيسى عن بعد قد جعلت الفيزيائيين أكثر اقتناعاً بأنه لا وجود لشيء من نوع «التأثير الفورى عن بعد» (أى الذى لا يتضمن وسطاً بينهما) الذى نجده

(١) كما تبدو لمجموعة إحداثيات تتحرك مع الجسم .

فى قانون الجاذبية لنيوتن . وحسب نظرية النسبية يحل التأثير عن بعد بسرعة الضوء دائما محل التأثير الفورى أو التأثير عن بعد بسرعة انتشار لانهائية وهذا مرتبط بحقيقة أن السرعة ح تلعب دوراً أساسياً فى النظرية . وفى الجزء الثانى من هذا الكتاب سنرى بأى شكل ستتعدل هذه النتيجة فى نظرية النسبية العامة .

تعليق :

مع تقدم عمليات التحويل النووية التى تنشأ من قذف العناصر بدقائق ألفا أو البروتونات أو أشعة جاما تأكدت علاقة تكافؤ الكتلة والطاقة حسب المعادلة $E = mc^2$ فمجموع الكتل المتبادلة التأثير مضافاً إليه مكافئ الكتلة للطاقة الحركية للدقائق المقذوفة (الفوتون) أكبر دائما من مجموع الكتل الناتجة عن التحويل والفرق بينهما هو الكتلة المكافئة لطاقة الحركة للدقائق المتولدة أو الطاقة الكهرومغناطيسية المشعة (فوتونات جاما) . وبنفس الطريقة نجد أن كتلة الذرة المشعة التى تتحلل فجأة أكبر دائما من مجموع كتل الذرات الناشئة بمقدار الكتلة المكافئة لطاقة الحركة للدقائق المتولدة (أو الطاقة الفوتونية) وقياسات الطاقة المتولدة عن التفاعلات النووية هى ومعادلات هذه التفاعلات يجعلان من الممكن تقدير الأوزان الذرية بغاية الدقة .

الفصل السادس عشر

نظرية النسبية الخاصة والتجربة

إلى أى مدى تؤيد التجربة نظرية النسبية الخاصة . . . ؟ ليس من السهل الإجابة على هذا السؤال للسبب الذى سبق ذكره عند الكلام عن تجربة فيزو الأساسية . وكلنا نعلم أن نظرية النسبية الخاصة قد تبلورت من نظرية ماكسويل لورنتز عن الظواهر الكهرومغناطيسية ، وتبعاً لذلك فإن كل الحقائق التى تؤيد هذه النظرية الأخيرة تؤيد نظرية النسبية . ولكنى أقتصر هنا على ذكر الحقيقة التالية وحدها نظراً لما لها من الأهمية البالغة .

إن نظرية النسبية تتيح لنا أن نعرف مقدما التأثيرات التى تتناول الضوء الآتى إلينا من النجوم الثابتة . ومن الممكن الوقوف على هذه التأثيرات بطريقة متناهية البساطة . وقد وجد أنها وهى راجعة إلى حركة الأرض بالنسبة لهذه النجوم الثابتة تتفق مع التجربة . ونحن نشير هنا إلى الحركة السنوية للموقع الظاهرى للنجوم الثابتة الناشئة عن دوران الأرض حول الشمس (الزغ) وإلى تأثير المركبات القطرية لحركات النجوم الثابتة بالنسبة إلى الأرض على لون الضوء الذى يصل إلينا منها ، وهذا التأثير

الأخير عبارة عن انتقال طفيف فى خطوط الطيف فى الضوء المرسل من النجوم الثابتة إلينا إذا قورن بوضع نفس هذه الخطوط إذا كان مصدر الضوء على الأرض (ظاهرة دوبلر) . والبراهين التجريبية التى تؤيد نظرية مكسويل - لورنتز وتؤيد أيضا نظرية النسبية أكثر من أن تحصى هنا . وهى فى الحقيقة تحدد الإمكانات النظرية بشكل لم تقو على الصمود أمامه غير نظرية ماكسويل لورنتز .

ولكن هناك مجموعتان من الحقائق التجريبية لا يمكن تطبيق نظرية ماكسويل لورنتز عليها إلا إذا أدخلنا على تلك النظرية - وذلك دون أن نلجأ إلى نظرية النسبية - فرضاً يبدو مفتعلا .

فمن المعروف أن أشعة المهبط وكذلك الأشعة المعروفة بأشعة بيتا التى تشعها المواد ذات الإشعاع كليهما تتكون من جسيمات صغيرة مشحونة بشحنة كهربية سالبة (إلكترونات) لها قصور ذاتى صغير جداً وسرعة كبيرة جداً . وإذا درسنا انحراف هذه الإشعاعات تحت تأثير المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية أمكننا أن نعرف بالضبط قانون حركتها .

وتواجهنا عند دراسة هذه الإلكترونات نظرياً فى ضوء نظرية الديناميكا الكهربية مشكلة ناشئة عن عجز هذه النظرية نفسها عن تفسير طبيعة الإلكترونات . فلما كانت الكتل الكهربائية المتشابهة النوع تتنافر فيما بينها فإن الكتل الكهربائية السالبة التى تكون الإلكترونات يجب أن

تتأثر بفعل تنافرهما فيما بينهما ما لم تكن واقعة تحت تأثير قوى من نوع آخر لم تتضح لنا حتى الآن^(١) . فإذا فرضنا أن المسافات التى تفصل بين الكتل الكهربائية التى تكون الإلكترونات تظل ثابتة أثناء تحركها بالنسبة لبعضها البعض (اتصال جاسى بالمعنى الميكانيكى الكلاسيكى) فإن القانون الذى نصل إليه معبراً عن حركة الإلكترون لا يتفق مع التجربة . ولقد كان لورنتز هو أول من افترض من وجهة نظر شكلية بحتة أن شكل الإلكترون يعانى انكماشاً فى إتجاه حركته وأن كمية الانكماش تتناسب

مع $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ وهذا الفرض الذى لا تبرره أى حقائق الديناميكا الكهربائية يمدنا بالقانون الخاص بحركة الإلكترون وهو القانون الذى حققته التجربة بدقة فائقة أخيراً .

ونظرية النسبية تؤدي إلى نفس قانون الحركة دون حاجة إلى أى افتراض آخر فيما يتعلق ببناء أو سلوك الإلكترون . وقد وصلنا إلى نتيجة مماثلة لهذا فى الفصل الثامن فيما يتعلق بتجربة فيزو التى تنبأت نظرية النسبية بتتبع مطابقة لها دون حاجة إلى أى افتراض حول طبيعة السائل .

والمجموعة الثانية من الحقائق التى أشرنا إليها تتعلق بمسألة إمكان أو

(١) توضح نظرية النسبية العامة أن الكتل الكهربائية للإلكترونات تتجمع معاً تحت تأثير قوى الجذب .

استحالة جعل حركة الأرض فى الفضاء محسوسة بالتجربة على الأرض .
لقد لاحظنا فى الفصل الخامس أن كل المحاولات التى أجريت لهذا
الغرض كانت نتائجها سلبية . وقبل وضع نظرية النسبية لم يكن
مستطاعاً إدراك سبب هذه السلبية لأن الأفكار الخاطئة التى توارثناها عن
الزمان والمكان حالت بيننا وبين الشك فى قيمة التحويل الجاليلى فى حالة
الانتقال من مجموعة إسناد إلى مجموعة إسناد أخرى . فإذا افترضنا أن
معادلات ماكسويل لورنتز صحيحة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م مثلاً
وجدنا عند تطبيقها على مجموعة إسناد أخرى م' تتحرك بحركة منتظمة
بالنسبة إلى م أنها غير مطابقة وذلك فى حالة افتراضنا أن علاقات
التحويل الجاليلى بين إحداثيات مجموعة الإسناد م ومجموعة الاسناد م' هى
السائدة . وهكذا يبدو أنه من بين كل مجاميع الإسناد الجاليلية هناك
مجموعة إسناد واحدة م تقابل حالة خاصة من الحركة تتميز عما عداها من
المجموعات بحيث تبدو فريدة فى بابها . وقد فسر بعض العلماء هذا الأمر
فيزيائياً بأن اعتبروا م فى حالة سكون بالنسبة «لأثير الفضاء» الذى تخيلوه
وفرضوا وجوده فرضاً ، بينما اعتبروا من الناحية الأخرى كل مجموعات
الإحداثيات م' التى تتحرك بالنسبة إلى م فى حالة حركة بالنسبة لهذا
الأثير . وقد نسبت إلى حركة م' فى الأثير (دفع الأثير بالنسبة إلى م) أشد
القوانين تعقيداً والتى كان يظن أنها تنطبق على م وبالتحديد استلزم الأمر
أن نفترض دفع الأثير هذا قائماً بالنسبة للأرض أيضاً . ولمدة طويلة وجه

علماء الفيزياء جهودهم صوب محاولة الاستدلال على هذا الدفع على سطح الأرض .

وفي إحدى هذه المحاولات ابتكر ميكلسن محاولة تبدو حاسمة إذ تصور مرأتين مثبتتين على جسم جاسئ بحيث يتقابل سطحاهما العاكسان (وجهها لوجه) . يستغرق شعاع الضوء زمناً محدداً ليقطع المسافة بينهما ذهاباً وإياباً إذا كان الجهاز ثابتاً بالنسبة للأثير ولكن إذا كان الجهاز متحركاً بالنسبة للأثير فقد وجد بالتقدير الحسابي أن الزمن τ اللازم للعملية في هذه الحالة يختلف قليلاً عن الزمن τ_0 ، وفوق ذلك فقد أظهر التقدير الحسابي أنه إذا كانت سرعة الجهاز v بالنسبة للأثير فإن هذا الزمن τ يختلف في حالة ما إذا كان اتجاه حركة الجسم عمودياً على مستوى المرأتين عنه في حالة ما إذا كان اتجاه حركته موازياً لهما . وبالرغم من أن الفرق بين هذين الزمنين ضئيل جداً فقد أجرى ميكلسن - مورلي تجربة على أساس التداخل الضوئي يمكن الاستدلال منها على ذلك الفرق . ومع كل جاءت نتيجة التجربة سلبية وكان هذا أمراً محيراً جداً لعلماء الفيزياء . وقد تغلب لورنتز وفترجرالد على هذا الموقف المتأزم بأن افترضوا أن حركة أى جسم بالنسبة للأثير تحدث انكماشاً في الجسم في اتجاه الحركة . وأن مقدار هذا الانكماش كاف لأن يعادل ذلك الفرق في الزمن الذى أشرنا إليه آنفاً . وبمقارنة هذا بما جاء في الفصل الثانى عشر نرى أنه من وجهة نظر النظرية النسبية كان هذا الحل للمشكلة هو الحل

الصحيح ولكنه تم فى نظرية النسبية على أساس أسلم جداً ، فليس فى نظرية النسبية شىء مثل مجموعة الإحداثيات المميزة أو الفريدة التى استوجبت فكرة الأثير . وعلى ذلك فليس هناك دفع فى الأثير وليس هناك داع لأية تجربة للاستدلال عليه . إن انكماش الأجسام المتحركة يتبع المبدأين الأساسيين للنظرية دون ما حاجة إلى اصطناع أى فروض خاص . والعامل الأول فى هذا الانكماش ليس هو الحركة فى حد ذاتها فليس لها أى معنى مستقل إنما هو الحركة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد التى وقع عليها الاختيار وعلى ذلك فجهاز المرأة ليكلسن - مورلى لا يعانى إنكماشاً بالنسبة إلى مجموعة إسناد تتحرك على الأرض ولكنه ينكمش بالنسبة إلى مجموعة إسناد فى حالة سكون بالنسبة إلى الشمس .

الفصل السابع عشر

فضاء منكوفسكى رباعى الأبعاد

إن القراء من غير الرياضيين يتتابهم الفزع والرعب حينما يقرأون عن الأشياء الرباعية الأبعاد ، وهم يحسون عند ذلك إحساساً لا يختلف كثيراً عما يحسون به فى مواجهة السحر والسحرة . ومع ذلك فليس هناك قول أعم من أن العالم الذى نعيش فيه متصل زمانى مكانى رباعى الأبعاد .

إن المكان متصل ثلاثى الأبعاد ، ونعنى بهذا أننا نستطيع أن نحدد موضع النقطة الساكنة بوساطة ثلاثة أعداد (إحداثيات) س . ص . ش . وأن هناك عدداً لا نهائياً من النقط المتجاورة يحدد موضع أى منها الإحداثيات س . ص . ش . يمكن أن تكون قريبة بأية درجة نختارها إلى الإحداثيات س . ص . ش الخاصة بالنقط الأولى ولهذا السبب نسميها المتصل . ونظراً لأن له إحداثيات ثلاثاً فإننا نقول عنه إنه ثلاثى الأبعاد .

وبالمثل فإن دنيا الظواهر الطبيعية وسميها منكوفسكى باختصار «العالم» طبعى أن تكون رباعية الأبعاد بالمعنى الزمانى - المكانى لأنها تتكون من حوادث فردية يعين كل منها أربعة أعداد هى بالأسم ثلاثة

إحداثيات محايه س . ص . س وإحداثى زمانى ز . والعالم بهذا المعنى متصل لأنه توجد بالنسبة لكل حادثة حوادث مجاورة (واقعية أو على الأقل يمكن تخيلها) لا حصر لها إحداثياتها س ، ص ، ش ، ز . وتختلف بقدر ضئيل جداً عن إحداثيات الحادثة الأولى س ، ص ، ش ، ز أما كوننا لم نتعود على النظر إلى العالم بهذا المعنى على أنه متصل رباعى الأبعاد فذلك راجع إلى أن الزمان كان يلعب فى الفيزياء قبل نظرية النسبية دوراً مختلفاً أو أكثر استقلالاً إذا قورن بإحداثيات المكان، وهذا هو الأصل فى العادة التى جرينا عليها من اعتبار الزمان متصلاً مستقلاً . وفى الواقع يعتبر الزمن فى نظر الميكانيكا الكلاسيكية مطلقاً بمعنى أنه مستقل عن موضع مجموعة الإسناد وحالتها من الحركة . ونرى تعبيراً عن هذا فى المعادلة الأخيرة من التحويل الجاليلى $z = z'$.

والنحو الرباعى الأبعاد فى تصور العالم هو الموضع الطبيعى فى نظرية النسبية حيث تجرد هذه النظرية الزمن من استقلاله . ويظهر هذا فى المعادلة الرابعة .

$$\frac{z - \frac{v}{c^2} \frac{y}{h}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = z'$$

فوق ذلك فإن الفرق الزمنى Δt رَ لحدثين بالنسبة إلى M لا يختفى عادة حتى ولو اختفى الفرق الزمنى $\Delta t'$ ز لنفس هاتين الحادثتين بالنسبة إلى M . إن الفاصل المكانى الخالص لحادثتين بالنسبة إلى M ينتج فاصلاً زمنياً لنفس الحادثتين بالنسبة إلى M . وليس هذا هو أهم اكتشافات منكوفسكى ، إذ أن اكتشافه الأهم يكمن فى الحقيقة فى تسليمه بأن المتصل الزمانى - المكانى الرباعى الأبعاد بالنسبة للنظرية النسبية يشبه شهاً بعيداً فى خواصه الشكلية الأساسية المتصل المكانى الثلاثى الأبعاد للهندسة الإقليدية^(١) وما علينا لإظهار هذا الشبه إلا أن نستبدل إحداثى الزمن العادى t بالكمية الخيالية $\sqrt{-1} \cdot t$ ح ز المتناسبة معه . وبهذا تأخذ القوانين الطبيعية التى تطابق نظرية النسبية الخاصة الشكل الرياضى الذى يلعب فيه إحداثى الزمن نفس دور إحداثيات المكان الثلاث . وتناظر هذه الإحداثيات الأربع من حيث الشكل إحداثيات الهندسة الإقليدية المكانية الثلاث . ويجب أن يكون واضحاً حتى لغير الرياضيين أنه نتيجة لهذه الإضافة الشكلية البحتة إلى معلوماتنا اكتسبت النظرية بالطبع وضوحاً لاحتد له .

إن هذه الملاحظات العابرة يمكن أن تعطى الفارئ صورة ما عن الفكرة الهامة التى ساهم بها منكوفسكى والتى بدونها لما استطاعت النظرية النسبية العامة - وسندرس أسسها فيما يلى من الكتاب - أن توسع

(١) انظر شرح هذه المسألة بتفصيل أكبر فى الملحق الثانى .

مجالها وان يتسع نطاقها إلى هذا الحد السامع . وسبب ان اجاب
منكوفسكى صعبة المثال على غير الرياضيين ولكنه لما كان يكفى لفهم
الأفكار الأساسية لنظرية النسبية الخاصة والعامة إماماً خفيفاً بهذه الأبحاث
فإنى سأتركها الآن على أن لا أعود إليها إلا عند نهاية الجزء الثانى من
هذا الكتاب .

الجزء الثانى

نظرية النسبية العامة

الفصل الثامن عشر

نظريتا النسبية الخاصة والعامة

لقد كان المبدأ الأساسى الذى دارت حوله كل الدراسات السابقة هو مبدأ النسبية الخاصة أى مبدأ النسبية الفيزيائية لكل حركة منتظمة . والآن دعنا مرة أخرى نحلل معناه بعناية ودقة .

لقد كان واضحاً فى جميع الأزمان أنه لا مندوحة - من حيث وجهة النظر التى تنقلها لنا - من اعتبار الحركة (كل حركة) حركة نسبية فقط . فإذا عدنا إلى المثل الإيضاحى الذى لجأنا إليه كثيراً - مثل الطريق الحديدى وعربة السقطار - فإننا نستطيع أن نعبر عن حقيقة الحركة التى تحدث هنا بالشكلين التاليين :

(أ) العربة فى حالة حركة بالنسبة إلى الطريق الحديدى .

(ب) الطريق الحديدى فى حالة حركة بالنسبة إلى العربة .

ويقوم فى (أ) الطريق الحديدى وفى (ب) عربة السقطار مقام مجموعة الإسناد عند تقديرنا لحالة الحركة لحادثة ما ، فإذا كان الأمر ببساطة هو الكشف عن الحركة أو وصفها فلا أهمية من حيث المبدأ إلى أى مجموعة

إسناد نمتد فهذا أمر كما سبق أن بينا واضح بنفسه للعيان ولكنه لا يجب الخلط بينه وبين النص الأكثر تعميماً وشمولاً والذي يسمى مبدأ النسبية الذي اتخذناه أساساً لأبحاثنا .

إن مبدأ النسبية لا ينص فحسب على أننا نستطيع أن نختار على السواء العربة أو الطريق كمجموعة إسناد لوصف أية حادثة (فهذا أيضاً واضح بنفسه للعيان) بل إنه فوق ذلك يؤكد على الأخص مايلي :
أننا إذا صغنا القوانين الطبيعية العامة كما نحصل عليها بالتجربة باستعمال :

(أ) الطريق كمجموعة إسناد .

(ب) عربة القطار كمجموعة إسناد .

فإن هذه القوانين العامة (أى قوانين الميكانيكا وقانون انتشار الضوء فى الفراغ) يكون لها نفس الشكل فى كلتا الحالتين . ويمكن التعبير عن هذا على النحو التالى أيضاً : ليس لأى من مجموعتى الإسناد م ، م' من حيث الملاءمة للوصف الفيزيائى للعمليات الطبيعية وضع فريد (أو حرفياً ليس لأى منهما ميزة خاصة) بالمقارنة بالمجموعة الأخرى . وعلى خلاف النص الأول فإن هذا النص الأخير ليس بالضرورة صحيحاً بدهة حيث إنه ليس مشمولاً فى تصورى الحركة أو مجموعة الإسناد أو قابلاً للاشتقاق منهما . بل إن التجربة وحدها هى التى يمكن أن تقرر صحته أو بطلانه .

ومع ذلك فإننا حتى الآن لم ندع أبداً تكافؤ جميع مجموعات الإسناد
م لصياغة القوانين الطبيعية . فلقد كان كل ما ذهبنا إليه أقرب إلى
مايلي :

فى أول الأمر ابتدأنا بفرض أن هناك مجموعة إسناد م حالتها من
الحركة تجعل القانون الجاليلى التالى صحيحاً بالنسبة لها : إذا عزلت
إحدى الجسيمات المادية عزلاً كافياً عن بقية الجسيمات وتركت وشأنها
فإنها تتحرك بحركة منتظمة فى خط مستقيم . فكانت القوانين الطبيعية
كأبسط ما يكون بالنسبة إلى م (مجموعة إسناد جاليلية) ولكن بالإضافة
إلى م وجدنا أنه ينبغى أن نعطى كل مجموعات الإسناد نفس الأفضلية
فى هذا المعنى ؛ ولذلك يجب أن تكون هذه المجموعات مكافئة للمجموعة
م من حيث الملاءمة لصياغة القوانين الطبيعية طالما كانت هذه المجموعات
فى حالة حركة منتظمة فى خط مستقيم بالنسبة إلى م وليست فى حركة
دوران . وعلى ذلك تعتبر كل مجموعات الإسناد هذه مجموعات إسناد
جاليلية . ولذلك كانت صحة مبدأ النسبية مفروضة بالنسبة لهذه
المجموعات لا لغيرها (أى لتلك التى تتحرك بحركة مختلفة النوع) إن هذا
هو المعنى الذى نقصده عندما نتكلم عن مبدأ النسبية الخاصة أو نظرية
النسبية الخاصة .

أما الآن فعلى العكس من هذا نود أن نعطى « مبدأ النسبية العامة »
النص التالى : « كل مجموعات الإسناد م و م' إلخ متكافئة من

حيث ملأها لوصف الظواهر الطبيعية (صياغة القوانين الطبيعية العامة) مهما كانت حالتها من الحركة» ولكن قبل أن نغضى إلى أبعد من هذا يجدر بى أن أشير إلى أن هذه الصيغة هى الأخرى مؤقتة أيضاً وسيصبح من الواجب استبدالها فيما بعد بأخرى أكثر إطلاقاً وشمولاً لأسباب ستوضح فى حينها .

ومنذ أن وضح أن مبدأ النسبية الخاصة له ما يبرره كان طبيعياً جداً أن يحس كل راغب فى فهم أوسع وأعم ميلاً فى قرارة نفسه إلى التقدم قدماً نحو مبدأ النسبية العامة . ولكن اعتباراً بسيطاً له وزنه يوحى - على الأقل فى وضعنا الحالى - بأن الأمل فى نجاح هذه المحاولة ضعيف جداً تعترضه صعاب هائلة لا بد من التغلب عليها أولاً . والآن دعنا نتخيل أننا قد انتقلنا إلى عربة القطار التى تسير بسرعة منتظمة . إن المسافر فيها لا يشعر بحركتها طالما هى تتحرك بانتظام ولهذا السبب يستطيع دون غضاضة أن يفسر الأمر على اعتبار أن العربة ساكنة والطريق هو الذى يتحرك . وفوق ذلك فإننا نجد أن هذا التفسير تبعاً لمبدأ النسبية الخاصة صحيح أيضاً من وجهة النظر الفيزيائية .

ولكن إذا تغيرت الآن حركة العربة إلى حركة غير منتظمة بسبب «فرملة» شديدة مثلاً فإن المسافر سيشعر فوراً مقابل ذلك بدفعة قوية إلى الأمام ، وسيترتب على انحباس هذه الحركة آثار أخرى تتناول الأجسام التى فى العربة مما سوف يشاهده المسافر فيها . وسوف يختلف ما يحدث

فى هذه الحالة عما حدث فى الحالة التى تأملناها أولا ؛ ولهذا السبب يبدو أنه من المستحيل أن تكون القوانين الميكانيكية السائدة بالنسبة إلى العربة التى تتحرك بحركة منتظمة أو الساكنة هى نفس القوانين التى تنطبق فى حالة العربة التى تتحرك بحركة غير منتظمة . وعلى أية حال فإنه واضح جداً أن القوانين الجاليلية لا تنطبق على العربة التى تتحرك بحركة غير منتظمة . ومن أجل هذا نشعر أننا مضطرون فى الوضع الحالى إلى أن نضفى نوعاً من الحقيقة الفيزيائية المطلقة على الحركة غير المنتظمة مما لا يتفق مع مبدأ النسبية العامة . ولكننا سنرى سريعاً أن هذا الرأى الشطط لا يمكن أن يفرض علينا طويلاً إذ سنجد لنا منه مخرجاً سهلاً .

الفصل التاسع عشر

مجال الجاذبية

إذا التقطت حجراً ثم تركته وشأنه فلماذا يسقط على الأرض . . . ؟
إن الإجابة المعتادة على هذا السؤال هي أن الأرض تجذب الحجر .
والفيزياء الحديثة تحيب إجابة مختلفة للأسباب الآتية : لقد أدت الدراسة
المفصلة للظواهر الكهرومغناطيسية إلى اعتبار أن التأثير عن بعد - دون
تدخل وسط ما بين الطرفين - عملية مستحيلة ، فإذا جذب مغناطيس
قطعة من الحديد مثلاً فإننا لا نكتفى بأن نعتبر أن معنى هذا هو أن
المغناطيس يؤثر مباشرة على الحديد خلال الفضاء الفارغ . ولكننا نضطر
إلى أن نتخيل مع فرداي أن المغناطيس يخلق حوله شيئاً فيزيائياً حقيقياً -
هو المجال المغناطيسي يؤثر بدوره على قطعة الحديد بحيث يدفعها إلى
الحركة نحو المغناطيس . ولن نناقش هنا مبررات هذه الفكرة العارضة ،
وهي في الحقيقة فكرة لا تخلو من التعسف بوجه ما ، ولكننا نكتفى بأن
نقول إنه باستخدام هذه الفكرة (فكرة المجال) أمكن تفسير الظواهر
الكهرومغناطيسية بطريقة أفضل بكثير مما لو استبعدناها خصوصاً فيما
يتعلق بانتشار الأمواج الكهرومغناطيسية . وآثار الجاذبية أيضاً تعامل
بنفس الطريقة .

إن تأثير الأرض على الحجر يحدث بطريقة غير مباشرة . فالأرض تخلق حولها مجالا جاذبيا يؤثر على الحجر مسبباً سقوطه . وتعلمنا التجربة أن شدة التأثير على جسم ما تتناقص كلما ابتعد هذا الجسم عن الأرض ، وذلك تبعاً لقانون محدد . وهذا يعنى من وجهة نظرنا أن القانون الذي يحكم خواص مجال الجاذبية فى الفضاء لابد أن يكون قانوناً تام التجديد حتى يتحدد بالضبط تناقص الأثر الجاذبى تبعاً لبعد الأجسام المؤثرة . وهذا القانون قريب مما يلى : «إن الجسم (أى الأرض) يولد حوله فيما يجاوره مباشرة مجالا ويحدد شدة واتجاه هذا المجال فى النقط البعيدة عن الجسم» القانون الذى يحدد خواص المجالات نفسها فى الفضاء .

وعلى العكس من المجالات المغناطيسية والكهربائية نجد أن مجالات الجاذبية تنفرد بميزة خاصة على جانب أساسى من الأهمية . «ذلك أن الأجسام التى تتحرك تحت تأثير مجال الجاذبية فقط تتحرك بعجلة لا تعتمد أبداً على الحالة المادية ولا الفيزيائية للجسم » . مثال ذلك أن قطعة الرصاص وقطعة الخشب تسقطان بنفس الكيفية تحت تأثير مجال الجاذبية فى الفراغ سواء بدأ سقوطهما من حالة السكون أو ابتدأه بسرعة واحدة . ويمكن التعبير عن هذا القانون الدقيق بطريقة أخرى تبعاً لما يلى : إننا وفقاً لقانون نيوتن للحركة نجد أن : القوة = - (كتلة القصور الذاتى) \times العجلة حيث تكون كتلة القصور ثابتاً مميزاً للجسم المعجل . فإذا أصبحت الآن الجاذبية سبب العجلة نجد أن :

حيث كتلة الجاذبية ثابت مميز للجسم . ومن هاتين المعادلتين نجد أن :

$$\text{العجلة} = \frac{\text{كتلة الجاذبية}}{\text{كتلة القصور الذاتى}} \times \text{شدة مجال الجاذبية}$$

فإذا كانت العجلة مستقلة عن طبيعة الجسم وحالته من السكون أو الحركة كما هو ثابت بالتجربة ، فعلى ذلك لابد أن تكون هذه العجلة واحدة بالنسبة إلى كل الأجسام . وإذا اخترنا الوحدات المناسبة أمكن أن نجعل هذه النسبة مساوية للوحدة . وبذلك نحصل على القانون : « كتلة الجاذبية لجسم ما مساوية لكتلة القصور الذاتى للجسم نفسه » .

صحيح أن هذا القانون المهم كان معروفاً من قبل فى الميكانيكا ولكن أحداً لم يفسره وقت ذاك ، ولا يمكن الوصول إلى تفسير مرضى له ما لم نسلم بالحقيقية التالية : « إن خاصيتى القصور الذاتى والوزن لجسم ما (حرفيا الثقلي) هما فى الحقيقة شئ واحد يبدو مرة بهذا الشكل والأخرى بالشكل الآخر حسب الظروف . وسنرى فى الفصل التالى لآى مدى يتفق هذا مع الواقع وسنرى كيف ترتبط هذه المسألة بفرض النسبية العامة .

الفصل العشرون

تساوى كتلتى القصور والجاذبية

كحجة فى صف المبدأ العام للنسبية

دعنا نتخيل حيزاً فارغاً قصياً ومنعزلاً عن النجوم وعن كل الكتل الأخرى ذات الحجم الذى يعتد به بحيث يتوافر لنا تقريباً فى هذا الحيز كل الشروط التى يتطلبها قانون جاليليو الأساسى . وعند ذلك سيكون ممكناً أن نختار مجموعة إسناد جاليلية لهذا الحيز (الجزء من العالم) ، وبالنسبة إلى هذه المجموعة ستستمر كل النقط الساكنة فى سكونها والنقط المتحركة كذلك ستستمر تتحرك فى حركة منتظمة فى خط مستقيم . دعنا نتخيل هذه المجموعة على هيئة قفص فسيح يشبه حجرة وبداخله راصد مزود بما يحتاج إليه من الأجهزة ، وطبعاً لا وجود للجاذبية بالنسبة إلى هذا الراصد بل إنه يجب عليه أن يربط نفسه بالحبال بأرضية القفص ، وإلا فإن أقل دفع على هذه الأرضية سيجعله يصعد ببطء نحو سقف القفص .

وقد ثبتنا وسط غطاء القفص من الخارج خطأً مربوطاً به حبل .
هب الآن أن كائناً (لا يعيننا هنا نوع هذا الكائن) بدأ يشد القفص من

اجبل بعوه نابه سد دب سيد الففص والراصد الذى فيه فى الصعود
إلى أعلى بحركة منتظمة العجلة ومع الزمن ستصل سرعتهما إلى قدر لم
يسمع به من قبل ما دمنا نرصد كل هذا من مجموعة إسناد أخرى لا تتأثر
بأى دفع .

ولكننا نريد الآن أن نرى كيف ينظر الرجل الذى فى القفص إلى
هذه العملية . إن عجلة القفص ستنتقل إلى الرجل عن طريق رد فعل
أرضية القفص وينبغى عليه إذا أن يتحمل هذا الضغط على قدميه إذا كان
لا يريد أن يرمى بكامل قامته على أرضية القفص . إنه يقف فى القفص ،
بنفس الطريقة التى يقف بها أى إنسان فى حجرة من حجرات منزل على
الأرض . وإذا ترك هذا الرجل جسماً كان فى يده من قبل وشأنه عندئذ
سيتوقف انتقال العجلة إلى هذا الجسم وسيسقط نحو الأرضية بحركة نسبية
ذات عجلة وسيقنع الراصد نفسه بعد ذلك « أن مقدار سقوط الجسم نحو
أرضية القفص سيظل ثابتاً (مقداراً واحداً دائماً) مهما كان نوع الجسم
الذى يستخدمه فى التجربة .

واستناداً إلى ما يعلمه الرجل جيد العلم عن المجال الجاذبى (وهو ما
قد وضعناه فى الفصل السابق) سيصل سريعاً إلى هذه النتيجة :

«إنه والقفص واقعان فى مجال جاذبى ثابت على مر الزمن » وبديهي
أنه سيتعجب لحظة لماذا لا يسقط القفص فى هذا المجال الجاذبى ولكنه
سيكتشف فوراً الخطاف الذى يتوسط غطاء القفص والحبل المربوط به

وسيصّل تبعاً لذلك إلى أن القفص معلق في حالة سكون في المجال الجاذبي .

هل يجدر بنا أن نسخر من الرجل وأن نقول إنه يخطئ الظن وإن تصوره للموقف باطل . . . ؟ لست أعتقد أنه يجوز لنا ذلك إذا كنا نريد أن نكون منصفين ، بل ينبغي علينا أن نسلم بأنه سلك في فهم الموقف سلوكاً لا يتعارض مع العقل أو القوانين الميكانيكية المعروفة . فعلى الرغم من أن القفص يتحرك بعجلة بالنسبة للحيز الجاليلي الذي فرضناه أولاً فإننا نستطيع مع ذلك اعتبار القفص ساكناً وهكذا يصبح لدينا أسباب قوية لتوسيع مدى مبدأ النسبية حتى يشمل مجموعات الإستاد التي تتحرك بعجلة .



الفصل الحادى والعشرون

ما هى أوجه النقص فى أسس الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة ؟

ذكرنا مراراً فى سياق ما تقدم أن الميكانيكا الكلاسيكية تبدأ من هذا القانون : « إن الجسيمات المادية المعزولة عن بعضها البعض عزلاً كافياً تستمر إما على الحركة المنتظمة فى خط مستقيم وإما على السكون » .

ولقد أكدنا مراراً أن هذا القانون الأساسى لا يمكن أن يكون صحيحاً إلا بالنسبة إلى مجموعات الإسناد (م) ذات حالات فريدة معينة من الحركة والتي فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة لبعضها البعض ، أما بالنسبة إلى مجموعات الإسناد الأخرى (م) فإنه غير صحيح . وعلى ذلك فإننا نفرق فى كل من الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة بين مجموعات الإسناد (م) التى يمكن أن يقال إن قوانين الطبيعة المعروفة تنطبق عليها وبين مجموعات الإسناد (م) التى لا تنطبق عليها هذه القوانين .

ولكن هذا الوضع لا يتفق وسلامة المنطق . إننا سرعان ما نساءل كيف يكون لبعض مجموعات الإسناد (أو حالاتها من الحركة) أفضلية على بقية المجموعات (أو حالاتها من الحركة) . . . ؟ ولماذا كان هذا التفضيل . . . ؟ ولكي أوضح جيداً معنى هذا السؤال دعني أضرب لك مثلاً :

هب أنني أقف أمام موقد غازي على جانبيه قدران متشابهان لا تميز العين بينهما ، وكلاهما ملىء حتى منتصفه بالماء وأني أشاهد البخار يتصاعد باستمرار من أحدهما دون الآخر لا شك في أن ذلك سيكون مدعاة للعجب حتى ولو لم أكن قد رأيت موقداً غازياً وقندراً من قبل ، ولكن لو أنني لا حظت وجود شيء أزرق اللون تحت القدر الأول دون الآخر لما كان هناك داع للاستغراب حتى ولو لم أكن قد رأيت شعلة غاز من قبل لأنني سوف أستطيع أن أقول إن هذا الشيء الأزرق هو السبب في تصاعد البخار أو على الأقل يحتمل ذلك . وكان حرياً بي أن أظل حائراً لو لم أكتشف هذا الشيء الأزرق اللون تحت أحد القدرين إذا كان سيتعين عليّ عندئذ أن أحاول اكتشاف ظرف آخر أسند إليه تصاعد البخار من أحد القدرين دون الآخر .

وبالمثل فإننا نسعى إلى اكتشاف شيء حقيقى فى الميكانيكا الكلاسيكية (أو فى نظرية النسبية الخاصة) نسند إليه اختلاف سلوك

مجموعات الإسناد م . لقد أدرك نيوتن هذا النقص وحاول التغلب عليه ولكنه فشل فى ذلك . ولكن ماك أدركه إدراكاً أوضح من الجميع ولهذا طالب بإلحاح بأن توضع الميكانيكا على أسس جديدة ولا يمكن تلأفى هذا النقص إلا فى فيزياء تتفق ومبدأ النسبية العامة فمعادلات نظرية النسبية تنطبق على جميع مجموعات الإسناد أياً كانت حالتها من الحركة .

الفصل الثانى والعشرون

استنتاجات قليلة من مبدأ النسبية العامة

لقد رأينا فى الفصل العشرين كيف أن مبدأ النسبية العامة يضعنا فى موقف نستطيع معه أن نشق صفات المجال الجاذبى بطريقة نظرية محضة . ولنفرض مثلاً أننا نعرف كيفية حدوث عملية طبيعية ما ، زماناً ومكاناً فى حيز جاليلى بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاليلية م . إننا نستطيع بطريقة نظرية محضة (أى بمجرد الحساب) أن نحدد كيف تبدو نفس هذه العملية الطبيعية بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م التى تتحرك بعجلة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م . وحيث إنه يوجد بالنسبة لهذه المجموعة الجديدة م مجال جاذبى فإننا نستطيع أيضاً على ذلك أن نحدد أثر هذا المجال على العملية موضوع الدراسة .

هـب أننا نعلم أن جسماً يتحرك بحركة منتظمة فى خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م (تبعاً لقانون جاليليو) فإنه يتحرك بعجلة فى خط منحى بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م التى تتحرك بعجلة (القفص) وهذه العجلة أو الانحناء تقابل تأثير المجال الجاذبى فى م على الجسم المتحرك ومن المعروف أن مجال الجذب يؤثر على حركة

الأجسام بهذا الشكل وعلى ذلك تكون هذه الأفكار لا جديد فيها .

ولكننا إذا طبقنا مثل هذه الأفكار على شعاع الضوء حصلنا على نتائج جديدة على قدر أساسى من الأهمية فمثل هذا الشعاع يتقل بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الجاليلية م بالسرعة ح فى خط مستقيم ومن السهل أن نرى أن مسار الشعاع لا يصبح خطأً مستقيماً بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م التى تتحرك بعجلة . ومن هذا نستخلص الآتى : « تنتشر أشعة الضوء بوجه عام فى خطوط منحنية فى المجال الجاذبى » . ولهذه النتيجة وجهان على جانب كبير من الأهمية :

أولاً : أنه يمكن التحقق منها عملياً على الرغم من أن الدراسة النظرية التفصيلية أظهرت أن انحناء الضوء الذى تستوجه أو تكشف عنه نظرية النسبية ضئيل جداً بالنسبة إلى مجالات الجاذبية التى فى متناول أيدينا عملياً . ولكن مقداره بالنسبة للشعاع الذى يمر ملامساً للشمس يبلغ ١,٧ ثانية من القوس وهذا يمكن الاستدلال عليه بالطريقة التالية : بعض النجوم الثابتة تبدو لمن يرصدها من فوق الأرض من مجاورة الشمس ، وعلى ذلك يمكن رصدها فى أثناء الكسوف الكلى للشمس وفى مثل هذه الفترات يجب أن تبدو هذه النجوم كأنها بعدت عن

الشمس بالقدر السابق ذكره بالمقارنة مع موضعها الظاهري حينما تكون الشمس فى مكان آخر من السماء ، والتحقق من صحة أو خطأ هذا الاستنتاج مسألة على جانب كبير من الأهمية وحلها العاجل منوط بالفلكيين^(١) .

ثانياً : تثبت هذه النتيجة أنه تبعاً للنظرية العامة للنسبية لا يمكن أن تكون صحة قانون ثبوت سرعة انتشار الضوء فى الفراغ (وهو أحد الفرضين الأساسيين فى نظرية النسبية الخاصة والذي رجعنا إليه مراراً) بلا حدود . لأن انحناء أشعة الضوء لا يمكن أن يحدث إلا إذا تغيرت سرعة انتشاره مع موقعه . والآن قد نتوهم أنه تبعاً لذلك تكون نظرية النسبية الخاصة ومعها نظرية النسبية بأكملها قد تمرغت فى التراب مع أن هذا فى الواقع ليس صحيحاً . إنه لا يثبت إلا أن صحة النسبية الخاصة محدودة الأفق وأن نتائجها صحيحة فيما يتعلق بالظواهر التى يمكن أن تهمل أثر المجال الجاذبى فيها وحدها (أى الضوء) .

لما كان كثير من المعارضين للنظرية النسبية يحتجون بأن نظرية النسبية العامة تتعارض مع نظرية النسبية الخاصة فإنه من المفيد لتوضيح حقائق

(١) لقد ثبت انحراف الضوء بالقدر الذى تحدده النظرية بواسطة تصوير النجوم الذى قامت به بعثة أرسلتها الجمعية الملكية والجمعية الملكية للفلك أثناء كسوف الشمس فى ١٩١٩/٥/٢٩ (انظر الملحق الثالث) .

هذا الموضوع أن نضرب لذلك مثلاً مناسباً . لقد كنا قبل تقدم الديناميكا الكهربائية ننظر إلى قوانين الكهرباء والإستاتيكية على أنها قوانين الكهرباء عموماً ولكننا الآن نعلم جميعاً أن المجالات الكهربائية يمكن اشتقاقها اشتقاقاً صحيحاً من الاعتبارات الإستاتيكية فى حالة واحدة فقط وهى حالة لا تنحى أبداً تماماً وهى تلك التى تكون الكتل الكهربائية فيها ساكنة تماماً بالنسبة إلى بعضها البعض وبالنسبة إلى مجموعة الإسناد فهل نكون على حق إذا قلنا استناداً إلى هذا إن معادلات المجالات فى الديناميكا الكهربائية لماكسويل تتعارض مع الإستاتيكا الكهربائية، طبعاً لا لأن الإستاتيكا الكهربائية حالة خاصة من الديناميكا الكهربائية، فقوانين الأخيرة تودى إلى قوانين الأولى فى حالة عدم تغير المجالات مع الزمن .

وليس هناك لأية نظرية فزيائية مصير أسعد من أن تصبح هى نفسها لبنة فى بناء نظرية أوسع منها تعيش هى فيها كحالة محدودة خاصة .

وفى مثل انتقال الضوء الذى سقناه رأينا أن نظرية النسبية العامة تمكنتنا من أن نشق نظرياً أثر مجال الجاذبية على العمليات الطبيعية التى نعرف قوانينها فى حالة عدم وجود مجال الجاذبية مقدماً . ولكن المشكلة التى تلفت النظر أكثر من غيرها والتى تهددنا نظرية النسبية العامة إلى مفتاح حلها هى المشكلة التى تتعلق بالبحث عن القوانين التى يخضع لها مجال الجاذبية نفسه . ودعنا الآن نتأمل ذلك لحظة .

إننا على علم تام بمناطق الزمان - مكان التى تخضع بصفة تقريبية

للطريقة الجاليلية متى اخترنا مجموعة الإسناد المناسبة . وهذه هى النواحي التى تختفى فيها المجالات الجاذبية . فإذا أسندنا الآن ناحية منها إلى مجموعة الإسناد م التى تتحرك بأى نوع من الحركة فإنه ينشأ عن ذلك بالنسبة إلى م مجال للجاذبية يتغير بتغير الزمان والمكان^(١) وطابع هذا المجال سيتوقف طبيعاً على الحركة التى نختارها للمجموعة م . وتبعاً لنظرية النسبية العامة يجب أن ينطبق القانون العام للمجالات الجاذبية على المجالات الى نحصل عليها بهذه الطريقة . وعلى الرغم من أنه ليس هناك وسيلة للحصول على كل المجالات الجاذبية بهذا الشكل يجب مع ذلك أن نتمسك بأمل استخلاص قانون الجذب العام من مثل مجال الجاذبية هذا . ولقد تحقق هذا الأمل على أكمل وجه ولكن كان علينا مقدماً أن نتغلب على مشكلة كبرى تتصل بأعمق طبائع الأشياء وإننى لا أستطيع أن أخفيها عن القارئ أكثر من هذا . إننا فى أمس الحاجة إلى أن نوسع دائرة أفكارنا عن المتصل الزمكاني إلى مدى أبعد مما بلغناه حتى الآن .

(١) أن هذا ناتج من تعميم الفكرة التى نوقشت فى الفصل العشرين .

الفصل الثالث والعشرون

سلوك الساعات وقضبان القياس

على مجموعة إسناد تدور

لقد تجنبنا عامداً حتى الآن الكلام عن التفسير الفيزيائي لمدلولات الزمان والمكان فى حالة نظرية النسبية العامة وعلى ذلك فإننى مشغول عن هذا التقصير خصوصاً والأمر الذى نحن بصدده كما تعلمنا نظرية النسبية الخاصة أشد ما يكون عمقاً وأهمية ولقد آن الأوان لكى نصحح هذا الخطأ ونستكمل هذا النقص ، وأبادر بالقول إن هذا لن يكون بالأمر الهين بالنسبة إلى القارئ إذ سيتطلب منه صبراً جميلاً وتأملاً عميقاً وقدرة فائقة على التجريد .

ولنبداً مرة أخرى بحالات خاصة طالما لجأنا إليها من قبل . دعنا نتخيل حيزاً من الزمان - مكان ليس به مجال جاذبى بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م التى اخترنا لها حالة مناسبة من الحركة . وفى هذه الحالة تكون م مجموعة إسناد جاليلية بالنسبة إلى هذا الحيز تنطبق عليها نتائج نظرية النسبية الخاصة . والآن دعنا نتخيل نفس الحيز وقد أسدناه إلى مجموعة إسناد أخرى م تدور بانتظام بالنسبة إلى المجموعة م ، ولكن نحدد أفكارنا

ونوضحها دعنا نتخيل مَ على شكل قرص مستو يدور فى مستواه حول مركزه . فإذا كان هناك راصد على حافة هذا القرص فإنه سوف يحس بتأثير قوة طاردة فى اتجاه نصف قطر القرص قد يفسرها راصد كان فى حالة السكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م على أنها من تأثير القصور الذاتى (قوة الطرد المركزية) ولكن الراصد الذى على القرص قد يعتبر هذا القرص مجموعة إسناد « ساكنة » وهو على أساس مبدأ النسبية العامة لا تنقصه المبررات ليفعل ذلك وتكون القوة التى تؤثر عليه وعلى كل الأجسام الأخرى الساكنة بالنسبة إلى القرص راجعة فى اعتباره إلى تأثير مجال جاذبى . ومع ذلك فإن التوزيع المكائى (فى المكان) لهذا المجال الجاذبى من نوع يستحيل تحقيقه على أساس نظرية نيوتن للجاذبية^(١) ولكن هذا لا يزعج الراصد الذى يؤمن ويتمسك بنظرية النسبية العامة فهو مصيب حينما يعتقد أنه من الممكن صياغة قانون عام للجاذبية لا يفسر فحسب حركات النجوم تفسيراً سليماً بل يفسر أيضاً مجال القوة التى يتعرض لها فى هذه التجربة .

ويجرى الراصد تجاربه على قرصه الدائرى مستعملاً الساعات وقضبان القياس وهو حين يفعل ذلك يهدف إلى أن يصل إلى تعاريف مضبوطة لمعنى مدلولات الزمان والمكان بالنسبة إلى القرص الدائرى مَ على أساس ملاحظاته فما عساه فاعل فى هذا المضمار ؟

(١) ان المجال يختفى عند مركز القرص ويزيد زيادة مضطردة تتناسب مع البعد عن المركز كلما تقدمنا إلى الخارج .

إنه أولاً سيضع ساعتين متماثلتين فى التركيب واحدة عند مركز القرص والأخرى عند حافته بحيث تكونان ساكنتين بالنسبة للقرص . ونحن الآن نتساءل هل ستجرى الساعتان بمعدل واحد من وجهة نظر (أى بالنسبة إلى الراصد على) مجموعة الإسناد الجاليلية التى لا تدور م . . ؟ إننا نجد أنه بالنسبة إلى هذا المرجع ستكون الساعة التى فى المركز ثابتة لا سرعة لها بينما حصلنا عليها فى الفصل الثانى عشر نجد أن الساعة الأخيرة ستكون أبطأ بصفة دائمة من الساعة التى عند مركز القرص الدائرى كما يراها الراصد على م . وواضح أن راصداً على القرص بجانب الساعة التى عند المركز سيرى نفس الشيء . وهكذا ستكون الساعة على قرصنا الدائرى أو فى كل مجال جاذبى وذلك لجعل الحالة أكثر شمولاً - أسرع أو أقل إسراعاً تبعاً للموضع الذى توضع فيه الساعة (فى حالة السكون) . ولهذا السبب يستحيل علينا أن نحصل على تعريف معقول للزمن بواسطة ساعات ضبطت وهى فى حالة السكون لمجموعة الإسناد . وتواجهنا صعوبة مماثلة عندما نحاول أن نطبق تعريفنا السابق للآنية فى مثل هذه الحالة . ولكننى لا أريد أن أخوض فى هذا الموضوع إلى أبعد من هذا .

وفوق ذلك يشير أمامنا - فى هذا الطور - تعريف إحداثيات المكان أيضاً صعوبات لا يمكن التغلب عليها . فإذا طبق الراصد قضبان قياسه العيارية (قضيب قياس قصير إذا قورن بنصف قطر القرص) مماسة لحافة القرص فإن طول هذا القضيب بالنسبة إلى راصد على مجموعة الإسناد

الجاليلية سيكون أقل من الواحد الصحيح لأن الأجسام المتحركة تعاني -
تبعاً للفصل الثاني عشر - قصراً في اتجاه الحركة . ومن الناحية الأخرى
لا يعاني قضيب القياس قصراً في طوله كما يبدو من م إذا طبق على
القرص في اتجاه نصف قطره . وإذا قاس الراصد أولاً محيط القرص
بقضيب قياسه ثم قاس قطره فإنه إذا قسم نتيجتي القياس الواحدة على
الأخرى لن يحصل كخارج للقسمة على العدد المعتاد $\pi = 3,14$ بل على
عدد أكبر^(١) بينما يكون ناتج هذه العملية طبعاً بالنسبة إلى قرص ساكن
بالنسبة إلى م هو π بالضبط وهذا يثبت أن قضايا هندسة إقليدس لا
تنطبق تماماً على القرص الدائر ولا على المجال الجاذبي بصفة عامة على
الأقل إذا اعتبرنا طول قضيب القياس هو الواحد الصحيح في كل الأوضاع
 والاتجاهات . ومن هذا تفقد فكرة الخط المستقيم أيضاً معناها . ولسنا
على ذلك في وضع نستطيع معه أن نعرف بدقة الإحداثيات س . ص .
ش بالنسبة للقرص بوساطة الطريقة التي اتبعناها في أثناء دراسة نظرية
النسبية الخاصة وطالما كما لا نستطيع تحديد إحداثيات أمكنة وأزمنة
الحوادث فإننا بالتالي لا نستطيع أن نعطي معنى دقيقاً للقوانين الطبيعية
التي تذكر فيها هذه الإحداثيات .

(١) علينا أن نستعمل خلال هذا البحث مجموعة الاسناد الجاليلية غير الدوارة لأننا
نستطيع التسليم إلا بصحة نتائج نظرية النسبية الخاصة بالنسبة إلى م (بالنسبة إلى م
يسود المجال الجاذبي) .

وهكذا تبدو كل استنتاجاتنا السابقة القائمة على النسبية العامة موضع تساؤل ومرجع هذا في الحقيقة إننا أصبحنا في أمس حاجة إلى الالتجاء إلى حركة التفاف بارعة حتى نستطيع أن نطبق مبدأ النسبية العامة تطبيقاً صحيحاً وساعد القارئ بذلك في الفصول التالية .

الفصل الرابع والعشرون

المتصل الإقليدى واللاإقليدى

تخيل أيها القارئ العزيز أن سطح مائدة رخامية قد بسط أمامنا .
إننا نستطيع أن نتنقل من أية نقطة على هذه المائدة إلى أية نقطة أخرى
عليها بأن نتسلل باستمرار من نقطة إلى نقطة «مجاورة» ونستطيع تكرار
هذه العملية ما شئنا . وبعبارة أخرى نقول أننا نستطيع الانتقال دون أن
نقوم بأية «قفزات» وإننى واثق أن القارئ يقدر بوضوح تام ما أقصده هنا
بلفظي «مجاورة» و «قفزات» ما لم يكن متعتاً فوق ما ينبغي . ونحن
نعبر عن هذه الخاصة للسطح بأن نصفه بأنه متصل .

دعنا نتخيل الآن أن لدينا عدداً كبيراً من القضبان الصغيرة متساوية
الطول وأن طولها صغير بالمقارنة بأبعاد قطعة الرخام ، وأعنى حينما أقول
متساوية الطول أننا إذا طبقناها الواحد على الآخر تقابلت كل أطرافها
تماماً . ثم دعنا ندع أربعة من هذه القضبان على المائدة الرخامية بحيث
تكوّن فيما بينها شكلاً رباعياً (مربعاً) قطراه متساويان طولاً . ولكي
نتأكد من تساوى القطرين نستعمل قضيب اختبار قصير . ثم دعنا نضيف
إلى هذا المربع مربعات متشابهة كل منها يشترك مع المربع الأول فى

قضيبي . ثم نوالى القيام بهذه العملية مع كل المربعات حتى تغطي أخيراً كل القطعة الرخامية تماماً بالمربعات وهذا الترتيب يجعل كل جانب من أى مربع مشتركاً بين مربعين وكل ركن مشتركاً بين أربعة مربعات .

وسيكون مدعاة للعجب حقاً أن نستطيع الاستمرار فى هذه العملية دون أن نكتنفنا الصعاب وما علينا إلا أن نفكر فيما يلى : إذا تقابلت فى أية لحظة ثلاثة مربعات فى ركن فإن جانبين من المربع الرابع يكونا قد وضعا ويكون تبعاً لذلك وضع الجانبين الآخرين قد تحدد تماماً ، ولكننى الآن لم أعد قادراً على ضبط الشكل الرباعى بحيث أن يتساوى قطراه فإذا جاء متساويين تلقائياً فهذه منحة خاصة تهيئها خواص المائدة الرخامية وقضبان القياس لا أملك حيالها إلا الدهشة شاكراً ، ولا بد لنا من كثير من أمثال هذه المفاجآت إذا كان لابد من نجاح التركيب .

وإذا مر كل شيء بسلام فإننى يحق لى أن أقول عند ذلك إن نقط المائدة الرخامية متصل إقليدى بالنسبة إلى قضبان القياس التى استعملت «كمسافة» (فترة - خطية) وإنى إذا أخذت ركناً من مربع واعتبرته «أصلاً» أو نقطة ابتداء فإننى أستطيع أن أصف وصفاً تحديدياً كل ركن آخر لائ مربع ما بالنسبة إلى هذا الأصل بوساطة عديدين ، فما على إلا أن أذكر عدد القضبان التى يجب أن أمر فوقها ابتداء من الأصل أولاً يميناً ثم إلى أعلى بعد ذلك حتى أصل إلى الركن موضع الاعتبار . وهذان العددان

يكونان عند ذلك «الإحداثيين الكارتيزيين» لهذا الركن بالنسبة إلى «مجموعة الإسناد الكارتيزية» التي يحددها ترتيب قضبان القياس .

ونحن إذا حورنا هذه التجربة المجردة التحوير التالي اهتدينا إلى أنه لابد هناك حالات لا تنتهى فيها التجربة بالنجاح . سوف نتصور أن القضبان تتمدد بمقدار يتناسب مع زيادة درجة حرارتها ثم نسخن وسط المائدة الرخامية دون أطرافها ففى هذه الحالة يمكن أن يظل قضبان من قضبان القياس متطابقين فى كل موضع على المائدة ولكن التركيب الذى أنشأناه من المربعات لابد وأن يضطرب فى أثناء التسخين لأن القضبان التى على وسط المائدة تتمدد بينما تظل تلك التى على الأطراف بلا تمدد .

وبالنسبة إلى قضبان القياس التى اعتبرناها - وحدة الأطوال - لا تعود المائدة الرخامية متصلاً إقليدياً ولا نعود نحن أيضاً فى وضع نستطيع معه تحديد الإحداثيات الكارتيزية مباشرة بوساطتها، ولكنه لما كان هناك أجسام أخرى لا تؤثر عليها درجة حرارة المائدة على نحو ما أثرت على قضبان القياس (وربما لا تتأثر إطلاقاً) لذلك قد يكون ممكناً أن نتمسك بوجهة النظر التى تعتبر المائدة «متصلاً إقليدياً» ويمكننا الوصول إلى هذا وبطريقة مرضية لو أننا أجرينا تعويضاً بارعاً فى عملية قياس أو مقارنة الأطوال .

ولكن إذا كانت القضبان من جميع الأنواع (أى من جميع الأجسام) تسلك جميعها على قطعة الرخام متفاوتة التسخين فيما يتعلق بتأثير الحرارة عليها نفس السلوك ، وإذا لم يكن لدينا أية وسيلة لبيان تأثير الحرارة غير

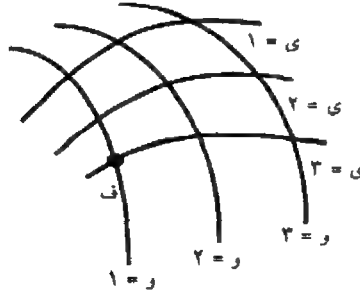
السلوك الهندسى لمصباح القياس فى التجارب المعاملة لتجربته التى تقدم وصفها فإن الخطه المثلى لدراسة سطح المائدة هى أن نطلق اسم المسافة واحدة على نقطتين على السطح ما دام يمكن أن نجعل نهايتى قضيب من قضبان القياس تنطبقان على هاتين النقطتين لأنه ليس أمامنا وسيلة أخرى حتى نتفادى أن تكون العملية تعسفية إلى أبعد مدى . وعلى ذلك يجب أن نسقط طريقة الإحداثيات الكارتيزية وأن نبحث عن طريقة أخرى لا تفترض صحة هندسة إقليدس بالنسبة إلى الأجسام الجاسئة^(١) ويلاحظ القارئ أن هذا الموقف يناظر الموقف الذى أدى إليه المبدأ العام للنسبية فى الفصل الثالث والعشرين .

(١) الوضع الرياضى لهذه المشكلة هو . إذا كان لدينا مسطح ما (بيضاضى مثلا) فى فضاء اقليدى ثلاثى الأبعاد فانه يوجد لهذا السطح هندسة ثنائية الأبعاد كما يوجد بالنسبة للمستوى . ولقد قام جاوس بمعالجة هذه الهندسة الثنائية الأبعاد من المبادئ الأولى دون أن يلجأ إلى حقيقة كون السطح يتعلق بمتصل اقليدى ثلاثى الأبعاد فإذا تخيلنا أننا نقيم انشاءات بوساطة قضبان جاسئة فى السطح (مشابهة لتلك التى أقمتها فى السطح الرخامى) فإننا سنجد أن القوانين التى تنطبق على هذه الانشاءات تختلف عن القوانين التى تؤدى إليها هندسة اقليدس المستوية فليس السطح متصلا اقليديا بالنسبة إلى قضبان القياس ولا نستطيع تعيين الاحداثيات الكارتيزية فى السطح . ولقد أوضح جاوس المبادئ التى يمكن تبعاً لها معالجة العلاقات الهندسية على السطح وهكذا أوضح معالم الطريق إلى طريقة ريمان فى معالجة المتصلات اللاإقليدية متعددة الأبعاد . وهكذا كان الرياضيون هم الذين حلوا منذ أمد بعيد المشكلات الشكلية التى يقودنا إليها مبدأ النسبية العامة .

الفصل الخامس والعشرون

إحداثيات جاوس

يرى جاوس أن الوسيلة التى تجمع بين التحليل والهندسة والتى تصلح لعلاج المشكلة يمكن بلوغها على النحو الآتى : لذلك نتخيل مجموعة من المنحنيات الاختيارية (انظر الشكل ٤) رسمت على سطح المائدة ونسميها المنحنيات (ى) ونشير إلى كل منها بعدد وقد رسمنا فى



(شكل ٤)

الشكل التوضيحي المنحنيات $ى = 1$ ، $ى = 2$ ، $ى = 3$ ، ويجب أن نتخيل بين المنحنيين $ى = 1$ ، $ى = 2$ عدداً لا نهائياً من المنحنيات

حيث ل ١١ ، ل ١٢ ، ل ٢٢ مقادير تعتمد بطريقة محددة جداً على
 ي ، و والمقادير ل ١١ ، ل ١٢ ، ل ٢٢ تحدد سلوك القضبان بالنسبة
 للمنحنيات (ي) والمنحنيات (و) وبالتالي بالنسبة لسطح المائدة أيضاً . وفي
 الحالة التي تكون فيها نقط السطح محل الاعتبار متصلاً إقليدياً بالنسبة إلى
 قضبان القياس يمكن رسم المنحنيات ي ، المنحنيات و وربط أعداد بالنسبة
 لها وفق المعادلة :

$$٢ ط ٢ = ٢ ي ٢ + ٢ و ٢$$

وبهذه الشروط تكون المنحنيات ي ، و خطوطاً مستقيماً بالمعنى
 الإقليدي وتكون متعامدة مع بعضها البعض ، وتكون إحداثيات جاوس
 هنا إحداثيات كارتيزية بكل بساطة . ومن الواضح أن إحداثيات جاوس
 ليست أكثر من ارتباط مجموعتين من الأعداد مع نقط السطح موضع
 الاعتبار بحيث تكون القيم العددية التي تختلف فيما بينها اختلافاً ضئيلاً
 مرتبطة بالنقط المتجاورة « في المكان » .

وحتى الآن كنا نطبق هذه الأفكار على متصل ثنائي الأبعاد ولكن
 طريقة جاوس هذه يمكن أن تطبق بسهولة على متصل ثلاثي الأبعاد أو
 رباعيها أو حتى أكثر من ذلك فإذا كان ممكناً الحصول على متصل رباعي
 الأبعاد فإننا يمكن أن نصوره بالطريقة الآتية : نربط بطريقة اختيارية كل
 نقطة من نقط هذا المتصل بأربعة أعداد س ١ ، س ٢ ، س ٣ ، س ٤ وتعرف
 بالإحداثيات ويقابل النقط المتجاورة قيم متقاربة للإحداثيات فإذا كانت

المسافة ϵ ط مرتبطه بالمتطتين المتجاورتين ف ، ف وهى قابلة للقياس
والتحديد فيزيائياً فإن المعادلة التالية تكون صحيحة :

$$\epsilon ط = \epsilon ل ١١ + \epsilon س ١٢ + \epsilon س ١٣ + \epsilon ل ١٤ + \epsilon س ١٥ + \epsilon س ١٦$$

حيث تكون المقادير ل ١١ . . . إلخ قيماً تتغير مع الموقع فى
المتصل . ولا يمكن أن نربط الإحداثيات س ١ . . . س ١٦ مع نقط المتصل
بحيث يصبح لدينا ببساطة :

$$\epsilon ط = \epsilon س ١ + \epsilon س ٢ + \epsilon س ٣ + \epsilon س ٤ + \epsilon س ٥$$

إلا إذا كان المتصل إقليدياً . وفى هذه الحالة تظل العلاقات فى
المتصل الرباعى قائمة على النحو الذى تقوم عليه فى قياساتنا الثلاثية
الأبعاد .

ومع ذلك فليست معالجة جاوس للمقدار $\epsilon ط$ التى أوضحناها عاليه
ممكنة دائماً إذ يقتصر ذلك على الحالات التى نضع فيها موضع الاعتبار
مناطق من المتصل صغيرة بدرجة تكفى لاعتبارها متصلات إقليدية . وهذا
مثل ينطبق بوضوح على حالة المائدة الرخامية ذات التغير المحلى لدرجة
الحرارة (متفاوتة التسخين) فإن درجة الحرارة ثابتة عملياً بالنسبة إلى جزء
صغير من المائدة ، وهكذا يكون السلوك الهندسى لقضبان القياس تقريبياً
كما يجب أن يكون وفق قواعد هندسة إقليدس ، ومن هنا نرى لماذا كان

الخلل فى إنشاء المربعات فى الفصل السابق لا يتضح جلياً إلا إذا امتد هذا الإنشاء فوق جزء كبير من سطح المائدة .

يمكننا أن نلخص ما تقدم فيما يلى : لقد اخترع جاوس طريقة نستطيع بها معالجة المتصلات عموماً علاجاً رياضياً وهذه الطريقة تحدد علاقات الحجم أو الكم (« المسافات » بين النقط المتجاورة) بأن تختص كل نقطة فى المتصل بعدد من الأعداد يساوى ما له من الأبعاد ويتم ذلك بشكل يجعل للمخصصة معنى واحداً ويجعل الأعداد (الإحداثيات الجاوسية) التى تخصص لنقط متجاورة تختلف فيما بينها بمقادير متناهية فى الصغر . ومجموعة الإحداثيات الجاوسية تعميم منطقى لمجموعة الإحداثيات الكارتيزية ويمكن تطبيقها أيضاً على المتصلات اللاإقليدية وذلك فقط عندما تسلك - من حيث الحجم أو المسافة المحددان - الأجزاء الصغيرة من المتصل محل الاعتبار سلوكاً يشبه النظام الإقليدى - وذلك كلما صغر الجزء من المتصل الذى نطبقها عليه .

الفصل السادس والعشرون

المتصل الزمان والمكان فى نظرية النسبية الخاصة

على اعتبار انه متصل إقليدى

إننا الآن فى وضع نستطيع معه أن نصوغ فكرة منكوفسكى التى أشرنا إليها مجرد إشارة عابرة فى الفصل السابع عشر بدقة أتم . لقد رأينا أنه تبعاً لنظرية النسبية الخاصة تَفْضَلُ بعض مجموعات الإسناد من حيث الملاءمة لوصف المتصل الزمان والمكان الرباعى الأبعاد غيرها . ولقد سمينا هذه المجموعات المفضلة مجموعات إسناد جاليلية . ولقد أوضحنا فى الجزء الأول من هذا الكتاب تفصيلاً التعريف الفيزيائى للإحداثيات الأربعة س ، ص ، ش ، ز التى تحدد الحادثة أو بعبارة أخرى النقطة فى المتصل رباعى الأبعاد . وفى حالة الانتقال من مجموعة إسناد جاليلية إلى أخرى تتحرك بحركة منتظمة بالنسبة للأولى تنطبق معادلات تحويل لورنتز . وهذه المعادلات هى الأساس الذى يركز عليه اشتقاق الاستنتاجات من نظرية النسبية الخاصة . وهى فى حد ذاتها (أى المعادلات) ليست إلا التعبير عن صحة قانون انتشار الضوء بالنسبة إلى مجموعات الإسناد الجاليلية .

ولقد وجد منكوفسكى أن تحويلات لورنتز تحقق الشروط البسيطة الآتية : دعنا نتخيل حادثتين متجاورتين يحدد مكانهما النسبى فى المتصل رباعى الأبعاد بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الجاليلية مَ الفروق المكانية الإحداثية ع س ، ع ص ، ع ش والفرق الزمانى ع ز ، وسنفرض أن الفروق المقابلة لهاتين الحادثتين بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاليلية أخرى هى ع س ، ع ص ، ع ش ، ع ز فإنه فى هذه الحالة تحقق هذه المقادير دائماً الشرط التالى ^(١) :

$$\begin{aligned} & \text{ع س}^2 + \text{ع ص}^2 + \text{ع ش}^2 - \text{ع ز}^2 = \text{ع س}^2 + \text{ع ص}^2 \\ & + \text{ع ش}^2 - \text{ع ز}^2 \end{aligned}$$

وصحة تحويل لورنتز مرتبة على هذا الشرط ونستطيع أن نعبر عن ذلك كمايلي :- المقدار

$$\text{ع ف}^2 = \text{ع س}^2 + \text{ع ص}^2 + \text{ع ش}^2 - \text{ع ز}^2$$

وهو يتعلق بنقطتين متجاورتين من نقط المتصل الزمانى المكانى رباعى الأبعاد له نفس القيمة بالنسبة إلى كل مجموعات الإسناد المختارة (الجاليلية) وإذا استبدلنا بالمقادير س ، ص ، ش ، $\sqrt{1 - \text{ع ز}^2}$

المقادير س_١ ، س_٢ ، س_٣ ، س_٤ نحصل أيضاً على :

(١) انظر الملحق ١ ، ٢ فالعلاقات التى اشتقت هناك للاحداثيات نفسها صحيحة أيضاً لفروق الاحداثيات وكذلك أيضاً لتفاضلات الاحداثيات (الفروق المتناهية الصغر) .

$$c^2 = c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 + c_4^2$$

مستقلة عن اختيار مجموعة الإسناد (أى أياً كانت مجموعة الإسناد)
ونسعى المقدار c ف « المسافة » التى تفصل بين الحادثتين أو النقطتين
رباعيتى الأبعاد .

وهكذا نجد أننا إذا اخترنا كمتغير للزمن المتغير الخيالى $\sqrt{-1} \cdot c$ بدلا من الكمية الحقيقية c فإننا نستطيع أن نعتبر المتصل الزمانى - المكانى
المتفق مع نظرية النسبية الخاصة متصلا إقليدياً رباعى الأبعاد وهذه هى
النتيجة التى تؤدى إليها اعتبارات الفصل السابق .

الفصل السابع والعشرون

المتصل الزماني والمكاني الخاص بالنظرية النسبية العامة

ليس متصلاً إقليدياً

استطعنا في الجزء الأول من هذا الكتاب أن نستعمل إحداثيات زمكانية كان من الممكن تفسيرها تفسيراً فيزيائياً بسيطاً مباشراً وكان من الممكن اعتبارها كما وُضح في الفصل السادس والعشرين إحداثيات كارتيزية رباعية الأبعاد . وكان هذا ممكناً استناداً إلى قانون ثبوت سرعة الضوء . ولكننا قد رأينا في الفصل الحادى والعشرين أن نظرية النسبية العامة لا يمكن أن تحتفظ بهذا القانون بل على العكس ظهر أنه تبعاً لهذه النظرية الأخيرة لا بد أن تعتمد سرعة الضوء دائماً على الإحداثيات متى وجد مجال جاذبى . وفى سياق توضيح هذا الأمر فى الفصل الثالث والعشرين وجدنا أن وجود المجال الجاذبى يبطل تحديد الإحداثيات والزمن ذلك التحديد الذى استخدمناه فى النظرية النسبية الخاصة .

ونتيجة لهذه الاعتبارات انتهينا إلى الاقتناع بأن المتصل الزماني المكاني فى النظرية النسبية العامة لا يمكن اعتباره متصلاً إقليدياً بل إننا نجد هنا الحالة العامة التى تمثلها المائدة الرخامية فى حالة الاختلاف الموضعى

فى درجة احراره (مما يوه السحى) واسى اعبرها مصد سالى الابعاد .
وكما كان مستحيلا هناك بناء مجموعة إحداثيات كارتيزية من قضبان
القياس المتساوية فإنه يستحيل هنا أيضاً أن نتخذ مجموعة من الأجسام
الجالسة والساعات (مجموعة إسناد) بحيث تكون قضبان القياس والساعات
التي رتب ترتيباً جاسثا (متناسكاً) بالنسبة إلى بعضها البعض قادرة
على تحديد الموقع والزمن مباشرة . ولقد كان هذا هو لب المشكلة التي
واجهتنا فى الفصل الثالث والعشرين .

ولكن الاعتبارات التي استعرضناها فى الفصلين الخامس والعشرين
والسادس والعشرين ترشدنا إلى طريقة التغلب على هذه الصعوبة . ذلك
بأن نسنء المتصل الزمانى المكانى لرباعى الأبعاد إلى إحداثيات جاسوس
بطريقة حكيمة ونخص كل نقطة من المتصل (حادثة) بأربعة اعداد س_١ ،
س_٢ ، س_٣ ، س_٤ وهى إحداثيات ليس لها أقل معنى فيزيائى مباشر بل
لمجرد ترقيم نقط المتصل بطريقة محددة ولكنها اختيارية . ولا يستوجب
هذا الترتيب حتى أن نعتبر س_١ = س_٢ ، س_٣ ، س_٤ إحداثيات « مكان »
و س_٤ إحداثى زمن .

وقد يظن القارىء أن تصوير العالم على هذا النحو تصوير مشوه فما
معنى أن نخص حادثة ما بالإحداثيات الخاصة س_١ ، س_٢ ، س_٣ ، س_٤ ؟
إذا كانت هذه الإحداثيات فى حد ذاتها ليس لها معنى ؟ ولكننا لو تمنعنا
الموضوع بعناية أكثر لرأينا أنه لا أساس لهذا القلق . فلو تأملنا مثلاً نقطة

مادية تتحرك بأية حركة لوجدنا أنه لو كان وجود هذه النقطة لحظياً لا يستمر مع الزمن لأمكن وصفها وتحديداتها فى الزمان - مكان بمجموعة واحدة من القيم s_1, s_2, s_3, s_4 . وهكذا يجب أن يتمثل استمرار وجودها بعدد لا نهائى من مثل هذه المجموعات من القيم التى تكون قيمها الإحداثية أيضاً متقاربة جداً بحيث توحى بالاستمرار . وعلى ذلك يصبح لدينا مقابل كل نقطة مادية خط كونى (أحادى الأبعاد) فى المتصل لرباعى الأبعاد . وهكذا تناظر هذه الخطوط فى المتصل نقطاً كثيرة تتحرك والحالة الوحيدة التى تصبح فيها هذه النقط ذات وجود فيزيائى هى فى الحقيقة حالة تقابلها . وحالة التقابل هذه نعتبر عنها رياضياً بأن يكون الخطان اللذان يمثلان حركتى النقطتين موضوع البحث لهما مجموعة خاصة من القيم الإحداثية s_1, s_2, s_3, s_4 مشتركة بينهما . وإذا تأمل القارئ هذا الأمر ملياً فلا شك أنه سيسلم بأن مثل هذه التقابلات فى الحقيقة هى الشاهد الفعلى الوحيد على الجوهر الزمكاني الذى تتضمنه البيانات الفيزيائية .

إننا إذ نصف حركة نقطة مادية بالنسبة إلى مجموعة إسناد لا نذكر شيئاً أكثر من تقابلات هذه النقطة مع نقط خاصة من مجموعة الإسناد . ونستطيع أيضاً أن نحدد القيم الزمانية المناظرة بواسطة رصد تقابلات الجسم مع الساعات مرتبطة مع رصد تقابل عقارب الساعات مع نقط معينة على ميناء تلك الساعات . وهو نفس ما يحدث فى حالة قياسات المكان

بوساطة مصباح العيـاس كما يصح دلت جيداً بوساطة مـيد بـعـص
الإمعان .

إن ما يلي صحيح بوجه عام : إن كل وصف فيزيائي يتحلل ذاتياً
إلى عدد من النصوص يشير كل منها إلى تطابق زمكاني لحادثتين أ ، ب
وإذا عبرنا عن كل نص من هذه النصوص بدلالة إحداثيات جاوس نقول
إن الإحداثيات الأربعة س_١ ، س_٢ ، س_٣ ، س_٤ لكلا الحادثتين واحدة .
وهكذا نحل في الحقيقة بصورة كاملة وصف المتصل الزمكاني بوساطة
إحداثيات جاوس محل وصف المتصل بوساطة مجموعات الإسناد ويجنبنا
الأول منهما أوجه النقص التي تنطوي عليها الطريقة الثانية فليس مقيداً
بضرورة فرض الطابع الإقليدي على المتصل الذي نريد تمثيله .

الفصل الثامن والعشرون

التعبير الدقيق عن مبدأ النسبية العام

إننا الآن فى وضع يسمح لنا بأن نستبدل بالتعبير المؤقت عن مبدأ النسبية العام الذى قدمناه فى الفصل الثامن عشر تعبيراً آخر دقيقاً جداً . لقد كان تعبيرنا عن ذلك المبدأ على هذه الصورة : كل مجموعات الإسناد م ، م' ... إلخ متكافئة من حيث وصف الظواهر الطبيعية (أو صياغة القوانين الطبيعية العامة) مهما كانت حالتها من الحركة . ولا يمكن الآن الاحتفاظ بهذه الصورة لأن استعمال مجموعات الإسناد الجاسئة على الطريقة التى اتبعت فى النظرية النسبية الخاصة لم يعد مستطاعاً بوجه عام لوصف الزمان - مكان فلا بد من استبدالها بمجموعات إحداثيات جاوس . والنص التالى يعبر عن الفكرة الأساسية فى مبدأ النسبية العامة . «كل مجموعات إحداثيات جاوس متكافئة من حيث ملاءمتها لصياغة القوانين الطبيعية العامة » .

ونستطيع أيضاً أن نضع مبدأ النسبية العامة هذا على نحو جديد آخر يجعله أسهل فهماً حتى عما لو اعتبرناه امتداداً طبيعياً لمبدأ النسبية الخاص . فتبعاً لنظرية النسبية الخاصة كانت المعادلات التى تعبر عن القوانين

الطبيعية العامة فيما قبل النسبية هي نفس المعادلات النسبية بشرط أن نحل المتغيرات الزمكانية s ، v ، sh ، z لمجموعة الإسناد الجديدة m محل المتغيرات الزمكانية s ، v ، sh ، z لمجموعة الإسناد الجاليلية m وذلك باستخدام تحويل لورنتز . أما تبعاً لمبدأ النسبية العام من الناحية الأخرى فيجب أن تحتفظ المعادلات بنفس الشكل عندما نطبق البديلات التحكيمية للمتغيرات الجاوسية s_1 ، s_2 ، s_3 ، s_4 . وذلك لأن كل تحويل (وليس تحويل لورنتز فقط) يقابل الانتقال من مجموعة ما من إحداثيات جاوس إلى أخرى .

وإذا أردنا أن نتمسك بنظرتنا القديمة ثلاثية الأبعاد إلى الأشياء فإننا نستطيع أن نصف التجديد أو التقدم الذى تناول الفكرة الأساسية لنظرية النسبية العامة على النحو التالى : إن نظرية النسبية الخاصة تتعلق بالحيز الجاليلى أى المناطق التى لا يوجد بها مجال جاذبى وفى هذه الحالة يستخدم كمجموعة إسناد مجموعة جاليلية أى جسم جاسىء حالته من الحركة مختارة بحيث ينطبق عليها قانون جاليليو لحركة نقطة مادية منعزلة ، أى حركة منتظمة فى خط مستقيم . وبعض الاعتبارات توحى بأننا يحسن بنا أن نرجع أو نسند نفس الحيزات الجاليلية إلى مجموعات إسناد لا جاليلية أيضاً وعندئذ نجد مجالاً جاذبياً من نوع خاص بالنسبة إلى هذه المجموعات (انظر الفصل العشرين والثالث والعشرين) .

ولكن شيئاً مثل الأجسام الجساسة ذات الخواص الإقليدية لا وجود له

فى المجالات الجاذبية وهكذا لا محل فى نظرية النسبية العامة لمجموعات الإسناد الجاسئة الخيالية هذه . وكذلك حركة الساعات . إنها تتأثر أيضاً بمجال الجاذبية بحيث يصبح تحديد الزمن فيزيائياً ويتم مباشرة بواسطة الساعات أقل قبولاً عما كان فى نظرية النسبية الخاصة .

ولهذا السبب نستعمل مجموعات إسناد غير جاسئة لا تتحرك ككل بأى شكل كان فحسب بل تعاني تغيرات فى الشكل على هواها أثناء حركتها وتستعمل لتحديد الزمن ساعات لا قيد على قانون حركتها فهو كيفما اتفق مهما كان شاذاً ، ويجب علينا أن نتصور كلا من هذا الساعات مثبتة فى نقطة من مجموعة الإسناد غير الجاسئة بشرط واحد فقط هو أن تكون القراءات التى تحددها الساعات المتجاورة فى لحظة واحدة مختلفة عن بعضها البعض بقدر ضئيل جداً ، وهذه المجموعة غير الجاسئة والتى يمكن أن نسميها بحق مجموعة إسناد رخوية هى فى الأصل ما يكافئ مجموعة إحداثيات جاوس رباعية الأبعاد التى نختارها بطريقة تحكيمية . إن ما يجعل الرخويات أقرب تصورا من مجموعة إحداثيات جاوس هو (ولو أنه لا يوجد مبرر حقيقى لذلك) الأثر الشكلى العالق بأذهاننا عن الكيان المنفصل لإحداثيات المكان فى مواجهة إحداثى الزمن . إن كل نقطة على المجموعة الرخوية تعالج على اعتبارها نقطة مكان وكل نقطة مادية ساكنة بالنسبة لها تعتبر ساكنة مادما نعتبر القوقعة الرخوة مجموعة إسناد . ويقضى مبدأ النسبية العامة بأن جميع هذه الرخويات يمكن استخدامها

كمجموعة إسناد لها نفس الحقوق. ونفس الأهلية فى صياغة القوانين العامة للطبيعة . أما القوانين نفسها فيجب أن تكون مستقلة تماماً عن اختيار المجموعة الرخوية .

إن القوة الهائلة التى ينطوى عليها مبدأ النسبية العامة تكمن فى التحديد الشامل الذى يفرض على قوانين الطبيعة تبعاً لما رأينا آنفاً .

الفصل التاسع والعشرون

حل مشكلة الجاذبية على أساس المبدأ العام للنسبية

أن القارئ الذى استوعب فى أناة وروية كل ما قدمنا من الاعتبارات لن يجد صعوبة ما فى فهم الوسائل المؤدية إلى حل مشكلة الجاذبية .

دعنا نبدأ أولاً بتأمل حيز جاليلى أى حيز خالى من المجال الجاذبى بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الجاليلية م . ونحن نعلم من نظرية النسبية الخاصة على أى نحو تسلك قضبان القياس والساعات بالنسبة إلى هذه المجموعة م وهو يشبه سلوك النقطة المادية المعزولة وهذه تتحرك بحركة منتظمة فى خط مستقيم .

ثم دعنا الآن نسند هذا الحيز إلى مجموعة إحداثيات جاوسية أيا كانت أو إلى مجموعة رخوة على اعتبار أنها مجموعة إسناد ولنسمها م' . عندئذ يكون هناك بالنسبة إلى م' مجال جاذبى ح (من نوع خاص) ونستطيع أن نقف على كيفية سلوك قضبان القياس والساعات وكذلك النقط المادية التى تتحرك بلا قيد بالنسبة إلى مجموعة الإسناد وذلك

بوساطة التحويل الرياضى ببساطة . ونحن نفسر هذا السلوك بأنه سلوك الساعات وقضبان القياس والنقط المادية تحت تأثير المجال الجاذبى ح . وعند ذلك دعنا نفترض أن أثر المجال الجاذبى على قضبان القياس والساعات والنقط المادية التى تتحرك بحرية يستمر وفقاً لنفس القوانين حتى فى حالة ما إذا كان المجال الجاذبى السائد لا يمكن اشتقاقه من الحالة الجاليلية الخاصة بمجرد تحويل الإحداثيات .

والخطوة التالية لذلك هى أن نبحث السلوك الزمكاني للمجال ح الذى اشتق من الحالة الجاليلية الخاصة بمجرد تحويل الإحداثيات . ويصاغ هذا السلوك فى قانون يكون دائماً صحيحاً مهما كان اختيار مجموعة الإسناد الرخوة التى يتم الوصف بالنسبة إليها . وليس هذا القانون مع ذلك هو القانون العام للمجال الجاذبى ما دام المجال الجاذبى الذى وصفناه هنا موضع الاعتبار من نوع خاص .

ومتى أمكن أن نهتدى إلى القانون العام للمجال الجاذبى يظل واجباً علينا أن نحصل على تعميم للقانون الذى حصلنا عليه آنفاً ، ولن يكون هذا بالأمر العسير لو أننا وضعنا نصب أعيننا المطالب التالية :

(أ) يجب أن يتفق التعميم المطلوب مع الفرض العام للنسبية .

(ب) إذا كان فى الحيز موضوع البحث أية مادة فإن كتلتها القصورية فقط وبالتالى طاقاتها حسب الفصل الخامس عشر هى التى توضع موضع الاعتبار لأنها هى التى يتسبب عنها المجال وهى التى تبعثه .

(ج) يجب أن يحقق المجال الجاذبى والمادة معاً قانون بقاء الطاقة (والدفع) وأخيراً فإن المبدأ العام للنسبية يسمح لنا بأن نحدد أثر المجال الجاذبى على مجرى كل تلك العمليات التى تحدث وفقاً لقوانين معلومة فى حالة غياب المجال الجاذبى ، أى تلك التى سبق أن دخلت فى إطار نظرية النسبية الخاصة ، ولييان هذا الأثر نتبع من حيث المبدأ نفس الطريقة التى سبق أن شرحناها بالنسبة إلى قضبان القياس والساعات والنقط المادية التى تتحرك بحرية .

ونظرية الجاذبية التى اشتقت بهذه الطريقة من الفرض العام للنسبية لا تبين غيرها بالنسبة لجمالها ولا من حيث تغلبها على النقص الذى تنطوى عليه الميكانيكا الكلاسيكية والذى أوضحناه فى الفصل الحادى والعشرين ، ولا من حيث تفسيرها للقانون التجريبي لتساوى كتلة القصور وكتلة الجاذبية فحسب بل لأنها فوق كل هذا قد نجحت فى تفسير ظاهرة فلكية عجزت عن تفسيرها الميكانيكا الكلاسيكية .

إننا إذا قصرنا تطبيق النظرية على الحالة التى يكون فيها المجال الجاذبى صغيرة والتى تتحرك فيها الكتل بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات بسرعات ضعيفاً مقارنة لسرعة الضوء فإننا نحصل كتقريب أول على نظرية نيوتن . وهكذا نحصل هنا على هذه النظرية دون حاجة إلى أية فروض خاصة فى حين أن نيوتن اضطر إلى إدخال الفرض الذى ينص على أن التجاذب بين نقطتين متجاورتين يتناسب عكسياً مع مربع المسافة

بينهما . وإذا راعينا منتهى الدقة فى التقديرات الحسابية ظهرت الانحرافات والفروق مع نظرية نيوتن ولو أن هذه الفروق جميعها مما لا يمكن اختباره عملياً نظراً لضآلتها المتناهية .

ومع ذلك يجب أن نتوقف قليلاً لتأمل بإمعان أحد هذه الفروق ،
فتبعاً لنظرية نيوتن يتحرك أى كوكب حول الشمس فى قطع ناقص
يحتفظ دائماً بموضعه بالنسبة للنجوم الثابتة لو أننا أهملنا حركة النجوم
الثابتة نفسها وتأثير الكواكب الأخرى محل الاعتبار . وهكذا إذا صححنا
حركة الكواكب الظاهرة وفقاً لهذين المؤثرين وإذا كانت نظرية نيوتن
صحيحة تماماً وجب أن نحصل على قطع ناقص كمدار للكواكب يكون
ثابتاً بالنسبة إلى النجوم الثابتة . وهذا الاستنتاج الذى يمكن التحقق منه
بدقة عظيمة كانت غاية ما يمكن بلوغه من الدقة فى حينها ، أمكن التحقق
منه بالنسبة إلى كل الكواكب إلا واحداً هو عطارد أقرب الكواكب إلى
الشمس فقد أصبح معروفاً منذ أيام لوفرييه أن القطع الناقص الذى يمثل
مدار عطارد بعد تصحيحه وفقاً للمؤثرين آنفى الذكر ليس ثابتاً بالنسبة إلى
النجوم الثابتة بل إنه يدور دوراناً بطيئاً جداً فى مستوى المدار على مثال
الحركة المدارية . وكانت القيمة التى حصلنا عليها لهذه الحركة الدورانية
للقطع الناقص المدارى تبلغ ٤٣ ثانية من القوس فى القرن وقد تأكد صدق
هذا التقدير إلى حدود ثوان قليلة من القوس ، ويمكن إيجاد تفسير مقبول
لهذا الأثر تبعاً للميكانيكا الكلاسيكية بشرط التسليم بفروض ضعيفة
الاحتمال وضعت خصيصاً لهذا الغرض .

ولكنه وجد على أساس نظرية النسبية العامة أن كل القطوع الناقصة التى تدور فيها الكواكب حول الشمس يجب أن تدور بنفس الطريقة آنفة الذكر وأن مقدار هذا الدوران بالنسبة إلى كل الكواكب ما عدا عطارد أصغر من أن يمكن اكتشافه بالوسائل الراهنة ولكنه فى حالة عطارد لابد أن يبلغ ٤٣ ثانية من القوس فى القرن وهى نتيجة تتفق أتم اتفاق مع التجربة .

وبخلاف هذا أمكن الوصول إلى استنتاجين آخرين فقط يمكن وضعهما موضع الاختبار ليشهدا لها وهما انحناء أشعة الضوء بواسطة مجال جاذبية الشمس^(١) وانتقال موضع خطوط الطيف فى الضوء الذى يصل إلينا من النجوم الكبيرة بالمقارنة بموضع نفس هذه الخطوط للأضواء التى يمكن إنتاجها بطريقة مشابهة على الأرض (أى بواسطة نفس الذرة)^(٢) وقد تأيد هذان الاستنتاجان اللذان استنتجا نظرياً من النظرية النسبية العامة بالبرهان العملى .

(١) كان ادجنجتون وآخرون أول من رصدوا ذلك فى سنة ١٩١٩ (انظر الملحق ٣) .

(٢) حقق ذلك آدمز سنة ١٩٢٤ (انظر الملحق ٣) .

الجزء الثالث

تأملات في الكون ككل

الفصل الثلاثون

الصعوبات الكونية فى نظرية نيوتن

تنطوى ميكانيكا الأجرام السماوية على مشكلة أساسية أخرى بخلاف المشكلة التى سبق مناقشتها فى الفصل الحادى والعشرين . وقد كان الفلكى سيلجر - فيما أعلم - هو أول من تعرض لدراستها بتوسع وتفصيل . وهذه المشكلة هى موضوع الكون ككل وكيف يجب النظر إليه . إن أول ما يتبادر إلى الذهن هو أن الكون من حيث المكان (والزمان) لا نهائى فهناك نجوم فى كل أجزاء الفضاء بحيث تصبح كثافة المادة ولو أنها شديدة التباين فى تفصيلاتها واحدة فى المتوسط فى كل الفضاء أو بعبارة أخرى فإننا إنما نذهب أو مهما استمدنا فى تجوالنا فى الفضاء سنجد فى كل مكان حشوداً مخففة من النجوم الثابتة واحدة النوع والكثافة تقريباً .

ولا تتفق هذه النظرية مع نظرية نيوتن إذ يستوجب هذا أن يكون للكون ما يشبه المركز تبلغ كثافة النجوم فيه أقصاها ثم تأخذ فى التناقص كلما ابتعدنا عن المركز إلى أن - وذلك بعد أبعاد شاسعة - تتلاشى

ليتلوها فراغ لا نهائى^(١) . إن الكون النجمى لابد أن يكون جزيرة منتهية فى محيط لا نهائى من الفضاء .

وهذا التصور للكون ليس مرضياً تماماً فى حد ذاته وهو أقل قبولا لأنه يضطرنا إلى التسليم بأن الضوء الذى ينبعث من النجوم وكذلك أفراد من المجموعة النجمية تخرج باستمرار إلى الفضاء اللانهائى دون رجعة وبحيث لا تعود إلى تبادل التأثير على موجودات الطبيعة الأخرى . إن مثل هذا الكون المادى المنتهى محتوم عليه أن يتلاشى تدريجياً وبانتظام .

ولتفادى هذا العيب اقترح سيلجر تعديلا لقانون نيوتن يفرض فيه أنه فى حالة المسافات الشاسعة تتناقص قوة الجذب بين كتلتين بأسرع مما تتناقص به هذه القوة تبعاً لقانون عكس المربع . وبهذه الطريقة يصبح ممكناً أن يظل متوسط كثافة المادة ثابتاً فى كل مكان حتى فى اللانهاية . وهكذا نتخلص من تلك الفكرة السقيمة التى تحتم أن يكون للكون شىء

(١) البرهان على ذلك : تتناسب تبعاً لنظرية نيوتن خطوط القوى التى تأتى من مالا نهاية وتنتهى فى الكتلة ك مع الكتلة ك وإذا كان متوسط كثافة المادة ث فى الكون ثابتاً فإن كرة حجمها ح ستحتوى على متوسط كتلة ح ث وهكذا يصبح عدد خطوط القوى التى تمر خلال السطح س - وهو سطح الكرة - إلى داخلها متناسب مع ث ح وهكذا يتناسب عدد خطوط القوى التى تمر من وحدة مساحات سطح الكرة إلى داخلها مع $(\frac{C}{r})$ أو $(\frac{1}{r^2})$ وعلى ذلك تصبح أخيراً شدة المجال على سطح الكرة مع ازدياد نصف قطر الكرة لا نهائية وهذا أمر مستحيل .

فى طبيعة المركز . ومن الطبيعى أننا هنا تتفادى ذلك العيب السالف الذكر ولكن بضمن باهظ هو تعديل قانون نيوتن وتعقيده دون أن يكون لهذا التعديل أى أساس نظرى أو تجريبى يستند إليه . إننا نستطيع أن نتخيل عدداً لا حصر له من القوانين التى تؤدى نفس الغرض ولنا ندرى أيها يجب أن نفضله لأن أياً من هذه القوانين سيستند إلى نفس العدد الضئيل من المبادئ النظرية العامة مثلما يستند قانون نيوتن .

الفصل الحادى والثلاثون

إمكان وجود كون منته ولكنّه غير محدود

ولكن الآراء فى بناء الكون تسير أيضا فى اتجاه آخر جد مختلف . فقد دفع بنا تقدم الهندسة اللاإقليدية إلى التسليم بأننا نستطيع أن نلقى الشك على لا نهائية الفضاء حولنا دون أن نرتكب ما يخالف قوانين الفكر أو التجربة (ريمان . هلمهولتن) ولقد عالج تفاصيل هذه المسائل بوضوح لا مزيد عليه كل من هلمهولتن وبوانكاريه ، بينما لا أملك هنا إلا أن أشير إليها فى إيجاز شديد .

دعنا نتخيل أولا عالماً ثنائى الأبعاد . كائنات مفرطة وكل ما يتعلق بها مفرطح خصوصاً أدوات قياس مفرطة جاسئة وهذه كلها حرة التحرك فى «مستوى» وبالنسبة إلى هذه الكائنات لا وجود لشيء خارج المستوى إن كل ما يمكن أن يحدث لها أو لمتعلقاتها المفرطة سيكون محصوراً حتماً فى المستوى الذى هو بمثابة الحقيقة الشاملة بالنسبة لها وعلى الأخص سيكون مستطاعاً هنا تنفيذ إنشاءات الهندسة الإقليدية - أى مثل تلك الإنشاءات الشبكية التى ناقشناها فى الفصل الرابع والعشرين بواسطة أشربة القياس ، وسيكون عالم هذه الكائنات على عكس عالمنا ثنائى

الأبعاد ولكنه مثل عالمنا يمتد إلى ما لا نهاية . إن فى عالمها متسع لعدد لا نهاية له من المربعات المكونة من قضبان القياس أى أن حجمه (سطحه) لا نهائى . وإذا قالت هذه الكائنات إن عالمها مستو فإنها تصدق لأنها تعنى بذلك أنها تستطيع تنفيذ إنشاءات الهندسة الإقليدية بأعواد قياسها التى تمثل على الدوام نفس المسافة مهما اختلفت مواضعها .

دعنا الآن نتأمل عالماً آخر ثنائى الأبعاد ولكنه هذه المرة على سطح كروى بدلا من أن يكون على سطح مستو . إن الكائنات المفرطحة وقضبان قياسها ومتعلقاتها الأخرى تتلاءم جيدا مع هذا السطح . ولا تستطيع هذه الكائنات أن تعتبر هندسة عالمها هندسة مستوية وقضبان القياس التى معها تحقيقاً للمسافة . . . ؟

إنها لا تستطيع ذلك لأنها إذا حاولت أن تقيم خطأ مستقيماً فإنها ستحصل على منحنى منطو على نفسه ذى طول معين منه يمكن قياسه بواسطة قضبان القياس . وبالمثل نجد أن لهذا مساحة منتهية يمكن مقارنتها بمساحة مربع مكون من قضبان القياس ، وروعة هذا المثل الذى نسوقه تكمن فى أنه يوضح لنا أن « كون هذه الكائنات منه غير محدود » .

ولكن الكائنات التى تعيش على سطح الكرة ليست بحاجة إلى أن تدور حول العالم فى رحلة لكى تتبين أنها لا تعيش فى كون إقليدى . إنها تستطيع أن تجد الدليل على ذلك فى كل جزء من أجزاء «عالمها» ما دامت لا تنقيد بجزء ضئيل منه . فإذا أخذت فى رسم خطوط مستقيمة

(وهى أقواس من دوائر بالنسبة لنا أصحاب الفضاء ثلاثى الأبعاد) متساوية الطول ابتداء من نقطة واحدة وفى جميع الاتجاهات فإنها ستسمى الخط الذى يربط نهايات هذه المستقيمات دائرة وعلى السطح المستوى تكون النسبة بين محيط الدائرة ونصف قطرها إذا قيس الطولان بقضيب واحد من قضبان القياس ثابتة تبعاً لهندسة إقليدس المستوية ومقدارها ط وهذا المقدار مستقل عن طول قطر الدائرة ولكن مخلوقاتنا المفرطحة ستجد لهذه النسبة المقدار :

$$\frac{\left(\frac{\text{نق}}{\text{نق}} \right) \text{ جا}}{\frac{\text{نق}}{\text{نق}}} \quad \text{ط}$$

أى أصغر قليلا من ط . ويزداد الفرق كلما زاد نصف قطر الدائرة بالنسبة إلى نصف القطر ث « لكرة العالم » . وبوساطة هذه العلاقة تستطيع المخلوقات الكروية أن تحدد نصف قطر كونها « عالمها » ولو كان جزء صغير نسبياً من كرة عالمها هو الذى يمكن أن تتناوله قياساتها . ولكن إذا كان هذا الجزء صغيراً جداً حقاً ف سوف لا تستطيع هذه الكائنات أن تثبت أنها على « عالم » كروى لا على مستوى إقليدى لأن الجزء الصغير جداً من سطح الكرة لا يختلف إلا قليلا عن سطح المستوى المساوى له فى الإتساع .

وهكذا إذا كانت المخلوقات التى تعيش على سطح كروى تعيش على كوكب لا تشغل مجموعته الشمسية إلا قدراً ضئيلاً من الفضاء الكروى لن يكون فى مقدورها أن تعرف إن كانت تعيش فى كون منته أم لا نهائى لأن « الجزء من الكون » الذى تتناوله أرصاد وأبحاث هذه الكائنات مستوى عملياً فى كلتا الحالتين أى إقليدى . ويتبع ذلك مباشرة أنه بالنسبة للكائنات التى على سطح كروى يتزايد محيط الدائرة أولاً تبعاً لنصف القطر حتى يصل إلى محيط الكون ولكن إذا استمر نصف القطر فى الازدياد يأخذ عند ذلك المحيط فى التناقص حتى يصل إلى الصفر .

وأثناء هذه العملية تستمر مساحة الدائرة فى الازدياد أكثر فأكثر إلى أن تصبح مساوية للمساحة الكلية لكل « كرة العالم » .

ربما تعجب القارىء لماذا وضعنا « كائناتنا » على كرة لا على أى شكل آخر مغلق . إن لهذا الاختيار سبباً يبرره يتلخص فى أن الكرة من بين كل الأشياء المغلقة الأخرى تنفرد بأن جميع النقط التى عليها متكافئة . إننى أسلم بأن النسبة بين محيط الدائرة ح ونصف قطرها ث تتوقف على نصف قطرها ث ولكن فيما يتعلق بالقيمة الواحدة لنصف القطر تكون هذه النسبة واحدة بالنسبة إلى جميع النقط التى على سطح « العالم » أو بعبارة أخرى إن كرة العالم سطح ثابت الانحناء .

ويوجد « لكرة العالم » ثنائية الأبعاد هذه مثل ثلاثى الأبعاد هو الفضاء الكروى ثلاثى الأبعاد الذى أكتشفه ريمان ، كل نقطة متكافئة

أيضاً وله حجم متته يحدده « نصف قطره » (٢ ط ٢ نق ٣) . ولكن هل من الممكن تصور فضاء كروى ... ؟ إن تصور أى فضاء لا يعنى سوى أن نتصور ملخص تجربتنا فيه ، أى التجربة التى نحصل عليها فى حركة الأجسام « الجاسئة » وعلى هذا النحو نستطيع أن نتصور الفضاء الكروى .

تصور أننا نرسم خطوطاً أو غمد أوتاراً من نقطة ما إلى جميع الاتجاهات ثم نضع علامة على كل من هذه الخطوط أو هذه الأوتار على بعد ث من النقطة بوساطة قضيب قياس .

إن كل نهايات هذه الخطوط أو الأوتار عند هذه العلامات تقع على سطح كروى ونستطيع على الأخص أن نقيس المسافة ف على هذا السطح الكروى بوساطة مربع مكون من قضبان القياس فإذا كان الكون أقليدياً فإن مساحة السطح تساوى $F = 4\pi r^2$ وإذا كان كروياً تكون أقل دائماً من $4\pi r^2$ وكلما زادت قيمة r زادت F على الصفر إلى أن تصل حد أقصى يحدده « نصف قطر العالم » ولكن إذا زادت قيمة r أكثر من ذلك أخذت المساحة فى التناقص تدريجياً إلى أن تصل أخيراً إلى الصفر . إن الخطوط الخارجية من نقطة الابتداء تبتعد عن بعضها البعض فى أول الأمر أكثر فأكثر ثم تتقارب بعد ذلك وأخيراً تجرى معاً مرة ثانية فى نقطة مقابلة لنقطة الابتداء . وفى هذه الظروف تكون قد عبرت كل الفضاء الكروى . وهكذا يبدو بسهولة أن الفضاء الكروى الثلاثى الأبعاد يشبه

الفضاء الكروى ثنائى الأبعاد ، إنه متته (أى متتهى الحجم) وليس له حدود تحده .

ويحسن أن نذكر أنه يوجد نوع آخر من الفضاء المنحنى هو الفضاء الناقصى ، الذى يمكن اعتباره فضاء منحنياً ، النقطتان المتقابلتان فيه متطابقتان ، أى لا يمكن التمييز بينهما بل تامتا التماثل ، وهكذا يمكن اعتبار الكون الناقصى إلى حد ما كوناً منحنياً له تماثل مركزى .

مما تقدم يتضح أنه من الممكن إدراك الفضاءات المقفولة التى ليس لها حد يحدها ومن بينها يعد الفضاء الكروى والفضاء الناقصى أكثرها بساطة لأن جميع نقط أى هذين الفضاءين متكافئة . وكتيجة لما تقدم ينهض أمام الفلكيين وعلماء الفيزياء سؤال على جانب عظيم من الأهمية : هل الكون الذى نعيش فيه لا نهائى أو أنه متته على نحو الكون الكروى . . . ؟ إن تجاربنا أقل جداً من أن تسمح لنا بالإجابة عن هذا السؤال ولكن نظرية النسبية العامة تسمح لنا أن نجيب عنه بقدر معقول من التأكيد وهكذا تجد المشكلة التى قابلتنا فى الفصل الثلاثين حلاً لها .

الفصل الثانى والثلاثون

بناء الفضاء تبعاً للنظرية النسبية العامة

ليست الخواص الهندسية للفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة مستقلة عن المادة بل إن المادة تحدد هذه الخواص . وعلى ذلك لاسبيل لنا إلى دراسة البناء الهندسى للكون ما لم يتوافر لنا مقدماً معرفة حالة المادة فيه كأساس لدراستنا . ونحن نعرف بالتجربة أن سرعات النجوم بالنسبة إلى مجموعة إسناد مناسبة ، صغيرة جداً إذا ما قورنت بسرعة انتشار الضوء . وعلى ذلك نستطيع على وجه التقريب أن نصل إلى رأى عن طبيعة الكون ككل لو عالجنا المادة باعتبارها ساكنة .

ونحن نعلم كما رأينا فى الفصول السابقة أن سلوك قضبان القياس والساعات يتأثر بالمجالات الجاذبية أى بتوزيع المادة وهذا فى حد ذاته يكفى لاستبعاد احتمال أن تكون هندسة الكون إقليدية . ولكنه أمر ميسور الفهم أن الكون الذى نعيش فيه لا يختلف إلا قليلاً عن الكون الإقليدى وهذه الفكرة تبدو أكثر احتمالاً ما دامت التقديرات الحسابية تظهر أن قياسات الفضاء المحيط بالمادة لا تتأثر إلا تأثيراً ضعيفاً حتى من أجسام بمثل كتلة الشمس . ويمكن أن نتخيل أن الكون من الناحية الهندسية يسلك سلوك

سطح منحني بغير انتظام في أجزائه الفردية دون أن يستعد كثيراً في أى مكان فيه عن المستوى . إنه يبدو كسطح بحيرة متموج ، وكون كهذا يمكن أن يقال عنه إنه شبه إقليدى وإنه من حيث فضاءه لا نهائى . ولكن التقديرات الحسابية تظهر أن كثافة المادة في كون شبه إقليدى لا بد أن تكون صفراً . وهكذا لا يمكن أن يكون مثل هذا الكون مأهولاً بالمادة في كل أجزائه ، إنه سيعيد أماننا الصورة غير المرضية التى رسمناها في الفصل الثلاثين .

فإذا كان لا بد أن يكون للمادة في الكون متوسط كثافة يختلف عن الصفر مهما كان هذا الاختلاف ضئيلاً فلا بد إذا أن يكون الكون غير إقليدى ولا حتى شبه إقليدى ، وعلى العكس تثبت نتائج التقديرات الحسابية أنه إذا انتظم توزيع المادة فإن الكون يكون بالضرورة كروياً (أو ناقصاً) ولما كان توزيع المادة تفصيلاً في الحقيقة ليس منتظماً فإن الكون الحقيقى سينحرف في أجزائه الفردية عن الكروى أى أن الكون سيكون شبه كروى ولكنه سيكون بالضرورة منتهياً . ولكن النظرية تمدنا في الواقع بعلاقة^(١) بسيطة بين التمدد الفضائى للكون ومتوسط كثافة المادة فيه .

(١) لنصف القطر نق للكون على المعادلة $\frac{2}{3} = \frac{2}{3} R^2$ وإذا استخدمنا النظام سم . جرام .

ثانية للقياس في هذه المعادلة حصلنا على $\frac{2}{3} = 1,08 \times 10^{27}$ حيث ث هو

متوسط كثافة المادة ، ه ثابت متعلق بثابت نيوتن للجاذبية .

الملاحق

- ١- اشتقاق بسيط لتحويل لورنتز .
- ٢- فضاء منكوفكس رباعى الأبعاد « عالم » .
- ٣- التأييد التجريبي لنظرية النسبية العامة .
- ٤- بناء الفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة .
- ٥- النسبية ومشكلة الفضاء .

الملحق الأول

اشتقاق بسيط لتحويل لورنتز

(تكملة للفصل الحادى عشر)

يجب أن نراعى أن يتطابق باستمرار المحوران السينيان لكل من مجموعتى الإحداثيات الموضحتين فى شكل ٢ - . وبذلك يتم بعض التوجيه النسبى لهما . وفى الحالة الحاضرة نستطيع أن نجزئ المسألة إلى أجزاء بأن نضع محل الاعتبار أولاً الحوادث التى تقع على المحاور (س) فقط . فأى هذه الحوادث يمثلها بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات (م) الإحداثى س و الزمن ز . وبالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات (م) الإحداثى س' والزمن ز' وعلينا أن نجد س' ، ز' إذا كنا نعلم س ، ز .

إن أية إشارة ضوئية تنتقل على طول المحور الإيجابى س تنتشر وفقاً للمعادلة $s = cz$.

$$(١) \quad \text{أى } s - cz = \text{صفر}$$

ولما كانت نفس الإشارة الضوئية يجب أن تنتشر بالنسبة إلى م' بالسرعة ح فعلى ذلك سيكون انتشار الضوء بالنسبة إلى المجموعة م' وفق المعادلة المماثلة

إن تلك النقط الزمكانية (الحوادث) التي تحقق المعادلة (١) لابد أن تحقق المعادلة (٢) أيضاً . وواضح أن هذا يتحقق عندما تتحقق عموماً العلاقة . (س - حر) = ت (س - حر) (٣)

حيث تشير ت إلى ثابت . لأنه تبعاً للمعادلة (٣) نجد أن اختفاء (س - حر) يتضمن اختفاء (س - حر) .

وإذا أجرينا المثل على أشعة الضوء التي تنتشر على المحور السلبى س نحصل على الحالة .

$$(٤) \quad (س - حر) = ت (س - حر)$$

وإذا جمعنا (أو طرحنا) المعادلات (٣) ، (٤) وأحللنا للسهولة الثوابت أ ، ب محل الثوابت ت ، ث بحيث تكون :

$$أ = \frac{ت + ث}{٢}$$

$$ب = \frac{ت - ث}{٢}$$

نحصل على المعادلات

$$(٥) \quad \begin{cases} س = أ س + ب حر \\ حر = أ حر - ب س \end{cases}$$

وهكذا يجب أن نحصل على حل المشكلة لو كنا نعلم الثوابت أ ،
ب : وهذه الثوابت يمكن معرفتها تبعاً لمايلي :

بالنسبة إلى أصل مَ يكون لدينا على الدوام سَ = صفر
وعلى ذلك يكون تبعاً للمعادلة الأولى من المعادلات (٥)

$$سَ = \frac{ب ح}{أ} ز$$

وإذا رمزنا بالرمز ع إلى السرعة التى يتحرك بها أصل مَ بالنسبة إلى
م يكون :

$$ع = \frac{ب ح}{أ} \quad (٦)$$

ونفس القيمة ع يمكن الحصول عليها من المعادلات (٥) إذا حسبنا
سرعة نقطة أخرى من مَ بالنسبة إلى م أو السرعة (الموجهة نحو المحور
السينى السلبى) لنقطة على م بالنسبة إلى مَ . وباختصار نستطيع أن
نسمى ع السرعة النسبية للمجموعتين .

وفوق ذلك فإن مبدأ النسبية يعلمنا أن طول وحدة القياس الساكنة
بالنسبة إلى مَ كما يبدو لراصد على م يجب أن يكون هو نفس طول
وحدة القياس الساكنة بالنسبة إلى م كما يبدو لراصد على مَ . ولكى نرى
كيف تظهر نقط المحور سَ لراصد على م فإننا نحتاج فقط إلى التقاط
صورة خاطفة (لقطة سريعة) للمجموعة مَ من المجموعة م . ومعنى هذا

أنه يجب علينا أن ندخل قيمة خاصة z (z من m) أى $z = \text{صفر}$ ولهذه القيمة من z نحصل من المعادلة الأولى (٥) على :

$$s = \frac{1}{a}$$

وعلى ذلك تكون النقطتان اللتان تفصلهما على المحور s المسافة s $s = 1$ مقيسة في المجموعة m مفصولتين في اللقطة الحاطفة أو الصورة اللحظية بالمسافة :

$$\Delta s = \frac{1}{a} \quad (٧)$$

ولكن إذا أخذت اللقطة السريعة من m ($z = \text{صفر}$) وإذا استبعدنا زمن المعادلات (٥) وأدخلنا في اعتبارنا التعبير (٦) حصلنا على :

$$s = \frac{1}{a} \left(\frac{v_c}{v_h} - 1 \right)$$

ومن هذا نستخلص أن نقطتين على المحور s تفصلهما المسافة a (بالنسبة إلى m) سيمثلهما في الصورة الحاطفة التي أخذناها المسافة :

$$\Delta s = \frac{1}{a} \left(\frac{v_c}{v_h} - 1 \right) \quad (٧)$$

ولكن لابد تبعاً لما تقدم ذكره أن تكون الصورتان متماثلتين وعلى ذلك لابد أن تكون γ س في (٧) متساوية مع γ س في (٧أ) بحيث نحصل على :

$$(٧ ب) \quad \frac{1}{\frac{\gamma^2 c^2}{h^2} - 1} = \gamma$$

والمعادلتان (٦) ، (٧ ب) تحددان الثابتين أ ب . وإذا أدخلنا قيمة هذين الثابتين في (٥) نحصل على المعادلة الأولى والرابعة اللتين سبق ذكرهما في الفصل الحادى عشر .

$$(٨) \quad \left[\begin{array}{l} \frac{s - \gamma c z}{\sqrt{\frac{\gamma^2 c^2}{h^2} - 1}} = s \\ \frac{z - \gamma \frac{c}{s}}{\sqrt{\frac{\gamma^2 c^2}{h^2} - 1}} = z \end{array} \right.$$

وهكذا حصلنا على تحويل لورنتز بالنسبة إلى الحوادث على المحور س وهو يحقق الشرط :

$$(١٨) \quad s^2 - \frac{c^2}{h^2} z^2 = s'^2 - \frac{c^2}{h^2} z'^2$$

وامتداد هذه النتيجة ليشمل الحوادث التى تقع خارج المحور س يمكن الحصول عليه بالاحتفاظ بالمعادلات (٨) وتزويدها بالعلاقات :

$$(٩) \quad \begin{cases} \text{ص} = \text{ص} \\ \text{ش} = \text{ش} \end{cases}$$

وبهذه الطريقة تحقق الفرض الذى ينص على أن سرعة الضوء ثابتة فى الفراغ (مهما كان اتجاه اشعته) بالنسبة إلى كلا المجموعتين م ، م . ويمكن توضيح ذلك كما يلى :

دعنا نتخيل أن إشارة ضوئية أرسلت من أصل م فى الوقت ز = صفر إنها سوف تنتشر تبعاً للمعادلة :

$$\text{ح} = \sqrt{\text{س}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2} = \text{ح ز}$$

وإذا ربعنا هذه المعادلة نجد أن الإشارة الضوئية سستنتشر تبعاً للمعادلة

$$(١٠) \quad \text{س}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2 - \text{ح}^2 \text{ ز}^2 = \text{صفر}$$

ويستوجب قانون انتشار الضوء مرتبطاً مع فرض النسبية أن يحدث انتقال الإشارة الضوئية - وذلك كما يبدو بالنسبة إلى المجموعة م - تبعاً للتعبير المناظر :

$$\text{ح} = \text{ح ز}$$

$$\text{أوس}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2 - \text{ح}^2 \text{ز}^2 = \text{صفر} \quad (110)$$

وحتى تكون المعادلة (110) نتيجة للمعادلة (10) يجب أن يكون

$$\phi = \text{س}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2 - \text{ح}^2 \text{ز}^2$$

$$(11) \quad (\text{س}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2 - \text{ح}^2 \text{ز}^2)$$

ولما كانت المعادلة (110) يجب أن تنطبق على النقط التي على المحور

س فإننا هكذا نحصل على $\phi = 1$ ومن السهل أن نرى أن تحويل لورنتز

يحقق فعلا المعادلة (11) عندما تكون $\phi = 1$ لأن (11) نتيجة للمعادلات

(110) ، (9) وعلى ذلك فهي أيضا نتيجة للمعادلات 8 ، (9) ، وهكذا

نكون قد قمنا باشتقاق تحويل لورنتز .

وتحويل لورنتز الذي تمثله المعادلتان (8) ، (10) لا يزال بحاجة إلى

أن يعمم . فمن الواضح أنه ليس محتما أن نختار محاور م بحيث تتوازي

مكانياً مع محاور م ، وليس محتما أيضاً أن تكون سرعة انتقال م بالنسبة

إلى م في اتجاه المحور س . وإذا أمعنا الفكر قليلا نرى أننا نستطيع أن

نبني تحويل لورنتز بهذا المعنى العام من نوعين من التحويلات هما

تحويلات لورنتز بالمعنى الخاص ، ومن التحويلات المكانية البحتة الأمر

الذي يناظر استبدال مجموعة الإحداثيات قائمة الزوايا بمجموعة جديدة

تتجه محاورها في اتجاهات أخرى . ونستطيع رياضياً أن نصف تحويل

لورنتز المعمم كمايلي :

انه يعبر عن س ، ص ، ش ، ز في حدود الدوال الخطيه المتماثله

للمقادير س ، ص ، ش ، ز بشكل يجعل العلاقة :

$$- \text{س}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2 - \text{ح}^2 \text{ز}^2 = \text{س}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2 - \text{ح}^2 \text{ز}^2 (11)$$

تتحقق بذاتها . أى أننا إذا أحللنا تعبيراتها في حدود س ، ص ،

ش ، ز محل س ، ص ، ش ، ز في الشق الأيسر من (11) يتفق مع الشق الأيمن عند ذلك .

الملحق الثانى

فضاء منكوفسكى رباعى الابعاد

(تكملة الفصل السابع عشر)

من الممكن أن نحدد معالم تحويل لورنتز بطريقة أكثر بساطة مما تقدم
إذا نحن أدخلنا الكمية الخيالية $\sqrt{1 - \beta^2}$ محل β كمتغير الزمن . وإذا
أدخلنا متفقا مع هذا :

$$s_1 = s$$

$$s_2 = \beta s$$

$$s_3 = \beta s$$

$$s_4 = \sqrt{1 - \beta^2} s$$

وبالمثل للمجموعة م . عند ذلك يمكن التعبير عن الشرط الذى تحقق
بالذات هكذا :

$$(12) \quad s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + s_4^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + s_4^2$$

أى أنه عن طريق هذا الاختيار للإحداثيات تتحول المعادلة (١١) إلى هذه المعادلة (١٢) .

ونرى من المعادلة ١٢ أن الإحداثى الزمنى الخيالى س_٤ يدخل فى شرط التحويل بنفس الطريقة التى تدخل بها الإحداثيات س_١ ، س_٢ ، س_٣ ونتيجة لهذه الحقيقة يدخل « الزمن » س_٤ تبعاً لنظرية النسبية فى القوانين الطبيعية بنفس شكل إحداثيات المكان س_١ ، س_٢ ، س_٣ .

ولقد سمى منكوفسكى المتصل رباعى الأبعاد الذى تصفه «الإحداثيات» س_١ ، س_٢ ، س_٣ ، س_٤ « عالماً » كما سمى « نقطة حادثة » « بنقطة عالم » ومن « حدوث » فى فضاء ثلاثى الأبعاد تتحول الفيزياء كما لو كانت « وجوداً » فى « العالم » رباعى الأبعاد .

وهذا «العالم» رباعى الأبعاد يحمل فى طياته تماثلاً قريباً من الفضاء ثلاثى الأبعاد فى هندسة إقليدس التحليلية . فإذا أدخلنا فى هذا الأخير مجموعة إحداثيات كارتيزية جديدة (س_١ ، س_٢ ، س_٣) بنفس الأصل فإن س_١ ، س_٢ ، س_٣ تكون دوال خطية متماثلة لـ س_١ ، س_٢ ، س_٣ التى تحقق بذاتها المعادلة $\overline{S_1}^2 + \overline{S_2}^2 + \overline{S_3}^2 = \overline{S_4}^2 + \overline{S_1}^2 + \overline{S_2}^2 + \overline{S_3}^2$.
والتماثل مع (١٢) تماثل تام . ويمكننا اعتبار « عالم » منكوفسكى بطريقة شكلية فضاءً إقليدياً رباعى الأبعاد (له إحداثى زمانى خيالى) ويكون تحويل لورنتز مناظراً « لدوران » مجموعة الإحداثيات فى «العالم» رباعى الأبعاد .

الملحق الثالث

الإثبات التجريبي لنظرية النسبية العامة

نستطيع أن نتخيل من الناحية النظرية المنظمة عملية تطور علم من العلوم الوصفية علي أنها فى الواقع عملية استقراء مستمرة . إننا نضع النظريات ونصوغها فى عبارة وجيزة . وهى تضمينات لعدد كبير من الملاحظات الفردية فى صورة قوانين وصفية . ومن هذه النظريات نستطيع تأكيد القوانين العامة عن طريق المقارنة . من هنا نرى أن نحو وتقدم علم من العلوم يشبه شهاً كبيراً عملية وضع أو إنشاء فهرس مبوب . إنه يبدو كما لو كان أمراً وصفيّاً محضاً .

لكن هذا الرأى رأى ضيق الأفق فهو لا يحيط أبداً بكل نواحي العملية فى الواقع ؛ لأنه بغض النظر عن الدور الهام الذى يلعبه الحدس والفكر الاستنباطى فى نحو علم من العلوم المضبوطة . إذ بمجرد أن يخطو علم ما من هذه العلوم خطواته الأولى لا تعد خطوات تقدمه النظرى التالية تتم عن طريق مجرد التسبويب ؛ لأن الباحث متأثراً بالمدلولات التجريبية يميل إلى إتخاذ منهج فكرى يعتمد منطقياً على عدد صغير من الفروض الأساسية التى تسمى بديهيات . ومثل هذا المنهج أو المذهب الفكرى

يسمى نظرية . والمبرر الوحيد لوجود النظرية هو أنها تتنظم عدداً كبيراً من المشاهدات المفردة . وفى هذا الأمر بالذات يكمن « صدق » النظرية .

وقد يقابل المجموعة المتشابهة الواحدة من المعطيات الوصفية عدة نظريات قد تختلف فيما بينها إلى حد بعيد . ولكن هذه النظريات من ناحية الاستنتاجات التى تشتق منها والتى يمكن اختبارها عملياً قد يكون الاتفاق بينها تاماً بحيث يتعذر العثور على استنتاج واحد يختلف حوله هذه النظريات . ومن أمثلة ذلك حالة مشهورة فى عالم الحياة يهتم لها الكثيرون هى نظرية داروين فى أصل الأنواع وتطورها عن طريق بقاء الأصلح فى معترك الوجود . والنظرية الأخرى فى تطور الأنواع على أساس انتقال الخواص المكتسبة وراثياً .

وهناك مثال آخر لذلك - هو الاتفاق البعيد المدى فى الاستنتاجات من نظريتين فى الميكانيكا النيوتونية من ناحية ونظرية النسبية العامة من الناحية الأخرى . وهذا الاتفاق يذهب بعيداً إلى حد أننا إلى الآن لم نعر إلا على استنتاجات قليلة يمكن وضعها موضع البحث والاختبار ولا تؤدى إليها أيضاً فيزياء ما قبل النسبية . وهذا على الرغم من الاختلاف العميق بين الفروض الأساسية للنظريتين . وستأمل فيمايلي مرة ثانية هذه الاستنتاجات الهامة وسناقش الشواهد التجريبية التى حصلنا عليها إلى الآن ، والتى تتعلق بها .

(١) حركة حضيض مسار عطارد:

يجب أن يدور الكوكب الذى يدور حول الشمس وذلك تبعاً لميكانيكا نيوتن وقانون نيوتن للجاذبية فى قطع ناقص حولها أو بعبارة أصح حول مركز الثقل المشترك للكوكب والشمس . وفى مثل هذه المجموعة تقع الشمس أو مركز الثقل المشترك فى إحدى بؤرتى القطع بحيث يأخذ البعد الشمس - الكوكب فى التزايد من حد أدنى إلى حد أقصى ثم يتناقص ثانية إلى الحد الأدنى وذلك خلال سنة كوكبية^(١) ولو أننا أحللنا محل قانون نيوتن قانوناً آخر للجذب مختلفاً بعض الشيء لوجدنا فى التقدير الحسابى أن الحركة ستظل تحدث تبعاً لهذا القانون الجديد بحيث يظل البعد الكوكب - الشمس دورى التغير . ولكن فى هذه الحالة ستكون الزاوية المحصورة بين الخطين الواصلين من الشمس إلى الكوكب فى أول هذه الفترة ثم فى نهايتها (أى من حضيض - أقرب نقطة إلى الشمس - إلى حضيض تال) تختلف عن 360° درجة ولن يكون خط المدار خطأ مقفولاً بل إنه مع الزمن سيملاً جزئياً حلقياً من مستوى المدار . أعنى بين دائرة أقل بعدد للكوكب ودائرة أكبر بعد له عن الشمس .

وتبعاً لنظرية النسبية العامة التى تختلف طبعاً عن نظرية نيوتن نجد أن تغييراً صغيراً عن حركة نيوتن - كبلر لكوكب ما فى مداره يجب أن

(١) هذا هو ما يسمى أحياناً بالأوج والحضيض . (المترجم) .

تحدث بحيث تكون الزاوية المحصورة بين القطر الشمس - الكوكب في الحضيض والذي يليه تزيد على الزاوية التي تناظر دورة كاملة بمقدار يحدده

$$+ \frac{24 ط 21}{ر 2 ح 1 (1 - 2 ي)}$$

ملاحظة : تقابل دورة كاملة الزاوية 2 ط في القياس المطلق للزوايا المستعمل في الفيزياء . والتعير عاليه يحدد المقدار الذي يزيد به قطر الشمس - الكوكب على هذه الزاوية خلال الفترة بين حضيض والذي يليه . وفي هذا التعبير ترمز أ لنصف المحور الأكبر للقطع الناقص ، ي إلى برونه ، ح إلى سرعة الضوء ، ر إلى مدة دورة الكوكب . ويمكن وضع هذه النتيجة على هذا النحو أيضاً : إن المحور الأكبر للقطع الناقص يدور تبعاً لنظرية النسبية العامة حول الشمس على نحو الحركة المدارية للكوكب ، وتستوجب نظرية النسبية أن يكون هذا الدوران بمقدار 43 ثانية من القوس في القرن بالنسبة للكوكب عطارد ، أما بالنسبة للكواكب الأخرى في مجموعتنا الشمسية فإن مقداره تبعاً لنظرية النسبية لا بد وأن يكون صغيراً جداً بحيث لا يسهل الاستدلال عليه^(١) .

ولقد وجد الفلكيون في الحقيقة أن نظرية نيوتن ليست كافية لحساب

(١) خصوصاً وإن الكوكب التالي وهو الزهرة له مدار يكاد يطابق الدائرة مما يجعل تحديد الحضيض أمراً بالغ الصعوبة (الحضيض هو الوقع الذي يكون فيه الكوكب أقرب ما يكون إلى الشمس) .

حركة عطارد التي كشفت عنها الأرصاد بدقة تناظر الدقة والحساسية التي وصلت إليها الأرصاد حالياً . ولقد وجد كل من لوفرييه سنة ١٨٥٩ ونيوكامب سنة ١٨٩٥ أنه بعد وضع كل عوامل الاضطراب المؤثرة على عطارد بواسطة بقية الكواكب محل الاعتبار قد تبقت حركة حضيفية لا تفسير لها مقدارها لا يختلف كثيراً عن المقدار المذكور عاليه وهو + ٤٣ ثانية القوس في القرن . وكان مقدار التقريب في هذه النتيجة لا يتجاوز ثوان قليلة فقط .

(ب) انحناء الضوء تحت تأثير مجال الجاذبية :

لقد ذكرنا في الفصل الثاني والعشرين أن نظرية النسبية العامة تنص على أن شعاع الضوء ينحرف عن طريقه عند مروره في مجال جاذبي وهذا الانحراف يشبه ما يعانيه مسار جسم قذف في مجال مجاذبي . ولذلك يجب أن نتوقع أن ينحرف شعاع الضوء الذي يمر قريباً من جرم سماوي نحو هذا الجرم . وزاوية الانحراف الذي يعانيه شعاع ضوئي يمر قريباً من الشمس على مسافة Δ نصف قطر الشمس من مركزها يجب أن يكون مقدارها :

$$\frac{1,7 \text{ ثانية من القوس}}{\Delta} = i$$

ويمكن هنا أن نضيف إلى ما تقدم أنه تبعاً للنظرية يكون نصف هذا

الانحراف ناشئاً عن المجال النيوتوني لجاذبية الشمس والنصف الآخر ناشئاً عن التغير الهندسى للفضاء (الانحناء) الذى تحدّثه الشمس .

وهذه النتيجة مما يمكن التحقق منها عملياً بوساطة التسجيل الفوتوغرافى لمواقع النجوم أثناء الكسوف الكلى للشمس والسبب الوحيد الذى يضطرنا إلى انتظار فترة كسوف الشمس هو أنه فى الأوقات الأخرى تكون السماء مضاءة بشدة الشمس لدرجة تجعل النجوم القريبة الموضع من قرص الشمس متعذرة الرؤية . والاثّر الذى تنتبأ به نظرية النسبية العامة يمكن فهمه بوضوح من الشكل التوضيحي المرافق لهذا . فإذا لم تكن الشمس ش موجودة فإن نجماً بعيداً للدرجة لا نهائية عملياً يرى فى الاتجاه ع إذا رصد من الأرض ولكنه نتيجة لانحراف الضوء الصادر من النجم بوساطة الشمس فإنه سيرى فى الاتجاه ع أى على بعد من مركز الشمس أكبر قليلاً مما يناظر موقعه الحقيقى .



والطريقة العملية لإجراء هذا الاختبار هى تصوير النجوم التى فى جوار الشمس أثناء كسوفها ثم تؤخذ صور أخرى لنفس تلك النجوم عندما تكون الشمس فى موضع آخر من السماء أى بعد أو قبل ذلك بشهور قليلة . فإذا قورنت هذه الصورة بالصورة القياسية فإن مواقع هذه النجوم على الصورة أثناء الكسوف يجب أن تبدو مزحزحة قطرياً (شكل ٥) إلى الخارج (بعيداً عن مركز الشمس) بمقدار يساوى الزاوية آ .

ونحن مدينون للجمعية الملكية والجمعية الفلكية الملكية باختبار هذا الاستنتاج المهم . فلقد قامت هاتان الجمعيتان ولم تقعهما الحرب ولا الصعاب المادية أو النفسية التى أثارته هذه الحرب فأرسلتا بعثتين واحدة إلى سوبرال (البرازيل) والأخرى إلى جزر برنسيب فى غرب أفريقيا . وأرسلتا عدداً من أشهر الفلكيين البريطانيين (ادنجتون وكننجهام وكروملين ودافيدسن) لكى تحصل على الصور الفوتوغرافية لكسوف الشمس يوم ١٩١٩/٥/٢٩ . ولقد كانت الفروق المنتظر وجودها بين الصور الفوتوغرافية للنجوم أثناء كسوف الشمس وصور المقارنة تبلغ من الصغر حد أجزاء قليلة من المائة من المليمتر فقط ، وهكذا كان لزاماً أن تراعى الدقة البالغة والحساسية الفائقة فى التقاط الصور ثم إجراء القياسات بعد ذلك .

ولقد أيدت نتائج هذه القياسات نظرية النسبية بطريقة تبعث على الرضا والارتياح التامين . والجدول التالى يوضح النتائج وهى تشمل المركبات قائمة الزوايا للانحرافات تبعاً للتقدير الحسابى استناداً إلى النظرية والمقادير التى وجدت عملياً فى التجربة بالقياس .

| رقم النجم | الإحداثى الأول | | الإحداثى الثانى | |
|-----------|----------------|--------|-----------------|--------|
| | تبعا للتجربة | حسابيا | تجريبيا | حسابيا |
| ١١ | - ٠,١٩ | - ٠,٢٢ | + ٠,١٦ | + ٠,٠٢ |
| ٥ | + ٠,٢٩ | + ٠,٣١ | + ٠,٤٦ | + ٠,٤٣ |
| ٤ | + ٠,١١ | + ٠,١٠ | + ٠,٨٣ | + ٠,٧٤ |
| ٣ | + ٠,٢٠ | + ٠,١٢ | + ١,٠٠ | + ٠,٨٧ |
| ٦ | + ٠,١٠ | + ٠,٠٤ | + ٠,٥٧ | + ٠,٤٠ |
| ١٠ | + ٠,٠٨ | + ٠,٠٩ | + ٠,٣٥ | + ٠,٣٢ |
| ٢ | + ٠,٩٥ | + ٠,٨٥ | + ٠,٢٧ | - ٠,٠٩ |

(ج) انتقال خطوط الطيف نحو الأحمر :

لقد أوضحنا فى الفصل الثالث والعشرين أنه فى مجموعة الإسناد م التى فى حالة دوران بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاليلية م تسير الساعات متماثلة البناء والتى تعتبر فى حالة سكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الدوارة بمعدلات تعتمد على مواقع الساعات وسنختبر الآن مدى هذا الاعتماد ومقداره كمياً . إن الساعة التى توضع على المسافة ف من مركز القرص يكون لها سرعة بالنسبة إلى م يحددها :

$$ع = ع ف$$

حيث تكون ع السرعة الزاوية لدوران القرص م بالنسبة إلى م فإذا كانت غ. تمثل عدد دقائق الساعة من الزمن (« معدل » الساعة) بالنسبة إلى م عندما تكون الساعة في حالة السكون فإن « معدل » الساعة غ. عندما تكون متحركة بالنسبة إلى م بالسرعة ع ولكنها ساكنة بالنسبة إلى القرص سيكون تبعاً للفصل الثاني عشر تبعاً للمعادلة :

$$غ \cdot غ. = 1 - \sqrt{\frac{ع^2}{ح^2}}$$

أو تحدده بدقة كافية المعادلة

$$غ = غ. \left(1 - \frac{ع^2}{ح^2} \right)$$

وإذا رمزنا إلى فرق الجهد لقوة الطرد المركزية بين موضع الساعة ومركز القرص بالرمز ش أى الشغل باعتبار سلبى الذى يجب أن يتم على وحدة الكتلة ضد قوة الطرد المركزى لكى ينقلها من موضع الساعة على القرص الدائر إلى مركز القرص . عند ذلك نحصل على :

$$ش = \frac{ع^2}{2} \quad \text{ومنه نرى :}$$

$$\text{أن غ} = \text{غ} . \left(١ + \frac{\text{ش}}{٢\text{ح}} \right)$$

ومن هذا التعبير نرى أولاً أن ساعتين متماثلتي التركيب تسيران بمعدلين مختلفين عندما توضعان على مسافات مختلفة من مركز القرص وهذه النتيجة صحيحة بالنسبة لراصد يدور مع القرص .

والآن نجد أن القرص واقع بالنسبة لراصد عليه فى مجال جاذبى جهده ش ولذلك تنطبق النتيجة التى حصلنا عليها عالىة على المجالات الجاذبية جيداً . وفوق ذلك فإننا نستطيع أن نعتبر الذرة التى تصدر عنها خطوط الطيف مثلها مثل الساعة ولهذا نجد أن العبارة التالية صحيحة :

« تصدر الذرة أو تمتص ضوءاً يوقف تردده على جهد المجال الجاذبى الذى تقع فيه الذرة » .

وتردد ذرة على سطح جرم سماوى سيكون أقل قليلاً من تردد ذرة من نفس العنصر موجودة فى الفضاء الحر أو على سطح جرم سماوى أصغر) والآن نجد أن $\text{ش} = - \text{ل} \frac{\text{ك}}{\text{ف}}$ حيث ل ثابت نيوتن للجاذبية ، ك كتلة الجرم السماوى . وهكذا نجد أن خطوط الطيف يجب أن تنتقل نحو الأحمر على سطوح النجوم مقارنة بخطوط الطيف لنفس العنصر على الأرض ومقدار هذا الانتقال هو :

$$\frac{L}{H^2} = \frac{G - G}{G}$$

ولقد وجد أن مقدار الانتقال نحو الأحمر بالنسبة للشمس كما تتنبأ به النظرية يبلغ حوالى جزئين من مليون من طول الموجة . وليس من الممكن الحصول على تقدير يوثق به لهذا المقدار بالنسبة للنجوم لأننا على العموم نجهل كل من الكتلة والقطر بالنسبة لها .

ومسألة وجرد هذا الأثر أو عدم وجوده مسألة لم تتقرر بصفة نهائية حتى الآن (سنة ١٩٢٠) ويعمل الفلكيون بهمة عظيمة وحماس بالغ للوصول إلى حلها . وبالنسبة إلى ضالة الأثر فى حالة الشمس نجد أنه من الصعب جداً أن نكون رأياً عن وجوده فبينما يضع جرب وياكم (بون) كنتيجة لقياساتها شخصياً وقياسات أفرشد وشوارتز تشيلد على الحزم السيانورية وجود هذا الأثر فوق كل شك نجد علماء آخرون على الأخص سانجون قد انتهوا إلى الرأى المضاد تبعاً لقياساتهم .

إن متوسط انتقالات الخطوط الطيفية نحو الجزء الأقل حيوداً من الطيف تكشف عنه بكل تأكيد الأبحاث الإحصائية على النجوم الثابتة ولكن لا يسمح لنا إلى الآن فحص المدلولات الممكن الحصول عليها بإتخاذ قرار محدد فيما إذا كانت هذه الانتقالات واجبا إرجاعها فى الحقيقة إلى تأثير الجاذبية أم لا . ولقد جمعت نتائج الأرصاد معا ونوقشت

بالتفصيل من وجهه نظر المسألة التي سببت انبعاثها مما تم بحسب جمع ٣٥
به فرويندلس^(١) .

على أى حال سوف نصل إلى قرار حاسم فى السنوات القليلة القادمة
فإذا كان انتقال خطوط الطيف نحو الأحمر بتأثير الجهد الجاذبى غير
موجود فإن نظرية النسبية تصبح مرفوضة لا محل لقبولها أما إذا كان
سبب هذا الانتقال يمكن إرجاعه بالتحديد إلى الجهد الجاذبى فإن دراسة
هذا الانتقال ستمدنا بمعلومات قيمة عن كتلة الأجرام السماوية .

ملحوظة : لقد أثبت آدمز انتقال خطوط الطيف نحو الطرف الأحمر
فى سنة ١٩٢٤ بأرصاء قام بها على سيريس شديد الكثافة حيث تبلغ
كثافته ثلاثين ضعفاً لكثافة الشمس .

(١) انظر البحث :

ز Zur Prüfung der allgemeinen Relativitäts Theorie س

فى مجلة :

Julius Springer Ber-ز ٢٥٠ , Naturwissenschaften 1919 No. 35, p.

الملحق الرابع

بناء الفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة

(تكملة الفصل الثانى والثلاثين)

لقد تقدمت معلوماتنا عن الفضاء العام (المشكلة الكونية) منذ صدور الطبعة الأولى من هذا الكتاب تقدماً هاماً يجدر ذكره حتى فى عرض مبسط للموضوع .

لقد كانت نظرتى الأولى للموضوع تستند إلى فرضين :

١ - هناك متوسط كثافة للمادة فى كل الفضاء وهو واحد فى جميع أجزاء الفضاء يختلف مقداره عن الصفر .

٢ - اتساع الفضاء («نصف قطره») مستقل عن الزمن .

ولقد تبين أن هذين الفرضين منسجمان تبعاً لنظرية النسبية العامة ولكن بعد إضافة حد افتراضى إلى معادلات المجال . وهو حد لم تكن النظرية فى حد ذاتها فى احتياج إليه كما لم يكن يبدو من وجهة النظر النظرية طبعياً (« الحد الكونى فى معادلات المجال ») .

أما الفرض الثانى فقد بدا لى أنه لا مفر منه فى ذلك الحين لأننى

كنت اظن ان المرء يتعرض لفيض من المزاعم لا نهاية له لو اُستمد عنه وأسقطه .

ومع ذلك فقد كان فريدمان الرياضى الروسى قد أوضح فى العشرينات من هذا القرن أن فرضاً آخر كان طبيعياً من زاوية نظرية بحتة . لقد أدرك أنه كان ممكناً الاحتفاظ بالفرض الأول دون إدخال الحد الكونى المتكلف فى معادلات المجال للجاذبية إذا كنا على استعداد للتخلى عن الفرض الثانى . أى أن معادلات المجال الأصلية تقبل حلاً يتوقف فيه « نصف قطر العالم » على الزمن (تمدد الفضاء) وبهذا المعنى يمكن القول مع فريدمان إن نظريته تستوجب تمدد الفضاء .

لم تمض بعد ذلك سوى سنوات قلائل حتى استطاع هبل أثناء بحث خاص عن سدم نهر المجرة أن يوضح أن خطوط الطيف يظهر فيها انتقال نحو الأحمر يزداد بانتظام مع بعد هذه السدم ، ولا يمكن تفسير هذا الأمر تبعاً لمعلوماتنا الراهنة إلا وفق مبدأ دوبلر أى باعتباره حركة تمدد بين النجوم كما تستوجه - تبعاً لفريدمان - معدلات الجاذبية . وعلى ذلك يعتبر اكتشاف هبل تأييداً للنظرية ولو إلى حد ما ولو أنه ظهر تبعاً لذلك أنه يثير مشكلة على وجه كبير من الغرابة .

إن تفسير انتقال خطوط الطيف نحو الأحمر الذى اكتشفه هبل فى سدم المجرة على أنه تمدد (وليس من السهل إنكار ذلك من الناحية النظرية) يؤدى بنا إلى الاعتقاد بأن بداية هذا التمدد كانت منذ ٩١٠ سنة

فقط بينما يبدو تبعاً للفلك الفيزيائي أن تكوين النجوم والمجموعات النجمية استغرق وقتاً أطول من ذلك بكثير وليس هناك بارقة أمل تشير إلى الطريقة التي ستغلب بها على النشور الفريد .

وأود فوق ذلك أن أبدي ملحوظة بأن نظرية الفضاء المتمدّد هي والمدلّولات التجريبية للفلك معاً لا تسمحان باتخاذ قرار حول طابع نهاية أو لا نهاية الفضاء (ثلاثي الأبعاد) بينما يخضع الفرض «الاستاتيكي» الأصلي للفضاء لإغلاق الفضاء (نهائيته) .

الملحق الخامس

النسبية ومشكلة الفضاء

من سمات فيزياء نيوتن البارزة أنه كان عليها أن تعطى كلا من الزمان والمكان وجوداً مستقلاً وحقيقياً مثل ما للمادة لأن فكرة العجلة تظهر فى قانون نيوتن للحركة . ولكن العجلة لا يمكن أن تشير فى هذه النظرية إلا إلى العجلة بالنسبة إلى المكان .

وهكذا لا مندوحة من اعتبار المكان بالنسبة إلى نيوتن كما لو كان ساكناً أو على الأقل ليس معجلاً حتى يمكن لنا أن نعتبر العجلة التى تظهر فى قانون الحركة مقداراً له معنى ما . وينطبق هذا أيضاً على الزمن الذى يدخل طبعاً هو الآخر فى تصور العجلة . ولقد شعر نيوتن نفسه وأكثر معاصريه تحمراً بأكبر الحرج من وجوب إعطاء كل من « المكان » نفسه وكذلك حالته من الحركة واقعاً فيزيائياً . ولكنه لم يكن هناك بد من ذلك فى تلك الأيام لكى تحتفظ الميكانيكا بمعنى واضح .

إنه حقاً ضرب من المغالاة والتعنت أن نعطي المكان عموماً حقيقة فيزيائية خصوصاً الفضاء الفارغ ولهذا كان الفلاسفة منذ أقدم العصور يرفضون مراراً وتكراراً مثل هذا الفرض . خذ مثلاً ديكارت لقد كان يرى

أن الفضاء صنو للامتداد والامتداد متعلق بالأجسام وعلى ذلك لا يمكن أن يكون هناك فضاء دون أجسام أى أنه ليس هناك فضاء فارغ » وضعف هذه الحجة يكمن أصلاً فيمايلي^١ : من المؤكد أن التصور امتداد تولد أصلاً عن تجاربنا فى إبعاد أو تقريب الأجسام الجاسئة من بعضها البعض ولكننا لا نستطيع استناداً إلى هذا أن نقطع أن تصور الامتداد لا تؤيده حالات أخرى لم تشترك بذاتها فى تكوينه . ومثل هذا التوسيع فى التصورات يمكن أن تبرره فائدته وجدواه فى تفسير النتائج التجريبية .

من هذا نرى أن التأكيد بأن الامتداد وقف على الأجسام تأكيد فى حد ذاته لا أساس له من الصحة . ومع ذلك سوف نرى فيما بعد أن نظرية النسبية العامة تذهب تقريباً إلى ما ذهب إليه ديكارت . إن الدافع الذى حدا بديكارت إلى اتخاذ هذا رأى الخلاب جداً هو شعوره بأنه لا يجوز أن نعطي جزافاً حقيقة لشيء مثل الفضاء لا يمكن « مكابדתه مباشرة »^(١) .

إن الأصل السيكولوجى لفكرة الفضاء أو للزومها بعيداً جداً عن الوضوح ولو أننا كثيراً ما نظن انسياقاً مع مألوف عاداتنا الفكرية أنه أمر واضح للعيان . لقد كان القدامى من علماء الهندسة يعالجون أشياء نصورية (الخط المستقيم والنقط والسطح) لا الفضاء بالذات . إنما حدث هذا بعد ذلك فى الهندسة التحليلية . وفكرة الفضاء برغم هذا فكرة توحى بها إحياء قوياً بعض التجارب البدائية البسيطة . تخيل أننا صنعنا

(١) يجب أن يؤخذ هذا التغير على علته .

صندوقاً . أننا نستطيع أن نرتب الأشياء بطريقة معينة داخل الصندوق حتى يمتلئ ، وإمكان مثل هذه الترتيبات أمر يتعلق بالشئ المادي الصندوق . إنه شئ ملازم للصندوق وإنه الفضاء الذى يحتويه الصندوق وهو شئ يختلف باختلاف الصناديق . شئ يعتقد طبعاً أنه مستقل عن كون الصندوق به أو ليس به إطلاقاً فى أية لحظة أى أجسام وعندما لا يكون فى الصندوق أشياء يبدو فضاؤه « فارغاً » .

والى هنا ارتبط تصورنا للفضاء بالصندوق ولكنه واضح مع ذلك أن إمكانيات التخزين التى تكون فضاء الصندوق مستقلة تماماً عن سمك جوانبه . أليس ممكناً أن نضغط هذه الجدران ونختزلها إلى أن تختفى من الوجود تماماً ومع ذلك يتبقى الفضاء الذى كانت تضمه هذه الجدران ؟ لا مرء فى أن عملية التحديد هذه أمر طبيعى جداً وهكذا يتبقى لدينا فكراً الفضاء - دون ما حاجة إلى الصندوق - شيئاً واضحاً من تلقاء نفسه ، ولو أنه يبدو لنا وهماً إذا ما غاب عنا أصل هذا التصور . وهذا يفسر لماذا كره ديكارت أن يعتبر الفضاء شيئاً مستقلاً عن الأجسام المادية أعنى شيئاً يمكن أن يوجد دون المادة^(١) (وفى نفس الوقت لا يمنع هذا ديكارت من

(١) حاول كانت التخلص من هذه الورطة فأنكر موضوعية الفضاء ، ولكن هذا الأمر لا يمكن أخذه على محمل الجد فامكانيات التخزين فى الفضاء وداخل الصندوق وأن كانت ملازمة له لها نفس الوجود الموضوعى الذى للصندوق نفسه وللأجسام التى توضع فيه .

اعتبار الفضاء تصوراً أساسياً فى هندسته التحليلية (ولقد جرد اكتشاف وجود فراغ فى البارومتر الزئبقي آخر أنصار ديكارت من كل أسلحتهم ومع ذلك فلا سبيل إلى إنكار أنه حتى فى هذا الطور البدائى علق كثير من عدم الرضا والارتباب بتصور الفضاء أو بالفضاء على اعتباره شيئاً حقيقياً مستقلاً .

إن الطرق التى يمكن تبعاً لها حشد الأجسام فى الفضاء (الصندوق) هى فى الحقيقة موضوع بحث الهندسة الإقليدية ثلاثية الأبعاد وليس أن بناءها البديهي يخدعنا إذ يجعلنا ننسى أنها تتعلق بمواقف يمكن تحقيقها .

والآن إذا كان تصور الفضاء قد نشأ على هذه الصورة فإنه يكون أصلاً فى ضوء تجربة ملء الصندوق فضاءً « محدوداً » وعلى ذلك فهذا التحديد لا يبدو أساسياً لأنه واضح أنه يمكن دائماً تصور صندوق أكبر يمكن أن يحتوى الصندوق الأصغر وبهذه الطريقة يبدو الفضاء كشيء غير محدود .

ولن أحاول هنا تقصى نشأة تصورى الفضاء ثلاثى الأبعاد وطبيعته الإقليدية راجعاً بهما إلى تجارب بدائية نسبياً إنما أفضل على ذلك أن أستعرض من زوايا أخرى دور تصور الفضاء فى تقدم ونمو الفكر الفيزيائى .

إننا إذا وضعنا صندوقاً صغيراً (ص) ساكناً نسبياً داخل صندوق

الفارغ ويصبح نفس الفضاء الذى يحويهما ملكاً مشاعاً لهما . وإذا كان (ص) متحركاً بالنسبة إلى (ص) يتعقد الأمر ويميل المرء إلى اعتبار (ص) يتضمن دائماً نفس الفضاء ولكنه جزء متغير من فضاء (ص) وعند ذلك يصبح ضرورياً أن يختص كل صندوق بفضائه الخاص باعتباره غير محدود وأن نفرض أن هذين الفضاءين يتحركان بالنسبة إلى بعضهما البعض .

ويبدو لنا الفضاء قبل أن تمثل تماماً هذا التعقيد كأنه وسط غير محدود أو وعاء تهيم فيه الأجسام المادية سابحة . ولكن أصبح الآن لازماً علينا أن نتذكر أن هناك عدداً لا حصر له من الفضاءات التى تتحرك بالنسبة إلى بعضها البعض . وتصور الفضاء باعتباره شئ موجود موضوعياً ومستقلاً عن بقية الأشياء تصور يرجع إلى فكر ما قبل العلم بخلاف فكرة وجود عدد لا نهائى من الفضاءات تتحرك بالنسبة إلى بعضها البعض . فهذه الفكرة الأخيرة تفرض نفسها منطقياً ولكنها - وهذا أمر فى غاية الغرابة - لم تلعب أى دور هام حتى فى الفكر العلمى .

الآن وقد وضح أماننا الأصل السيكولوجى لتصور المكان يحق لنا أن نتساءل : ما هو الأصل السيكولوجى لتصور الزمان . . . ؟ لاشك فى أن هذا التصور مرتبط بمسألة « التذكرة » كما هو مرتبط بالتمييز بين التجربة الحسية واستعادة ذكرى هذه التجربة . ومن المشكوك فيه فى حد ذاته أن يكون التمييز بين التجارب الحسية واستعادة ذكرى هذه التجارب (أو

التخيل البسيط لها) شئ قد أعطى لنا سيكولوجياً مباشرة . فكل منا قد عانى الشك فيما إذا كان قد كابد فعلاً إحساساً أو أنه حلم به فقط ومن المحتمل أن تكون القدرة على التمييز بين هذين البديلين نابعة من القدرة الخلاقة للمخ .

إننا نربط بين التجربة و «الذكرى» ونعتبرها أسبق بالمقارنة «بالتجارب الراهنة» وهذا مبدأ ترتيبي ذهني لذكريات التجارب وإمكان تحقيق هذا المبدأ يعطينا التصور الذاتي للزمن أى ذلك التصور الذى يرجع إلى ترتيب تجارب الفرد .

ولكن ماذا نعنى بجعل تصور الزمن موضوعياً ؟ دعنا نتأمل مثلاً يوضح لنا ذلك . هب أن أحداً من الناس أ (أنا) شاهد البرق وأنه فى نفس الوقت شاهد سلوكاً للشخص ب ينم عن ارتباطه بنفس تجربته هو «مشاهدة البرق» هكذا يشترك أ ، ب فى تجربة مشاهدة البرق ، وعلى ذلك تتولد عند أ فكرة أن أشخاصاً آخرين يشتركون معه فى نفس التجربة وهكذا تصبح مشاهدة البرق بعد أن كانت تجربة شخصية محضة ، تجربة للآخرين (أو فى النهاية مجرد تجربة ممكنة الوجود) على هذا النحو نجد أن التفسير «أنها تبرق» الذى وعيناه أول الأمر كتجربة شخصية قد أصبح الآن يفسر أيضاً على أنه حادثه (موضوعية) وهى بهذا الشكل مثل أو رمز لكل الحوادث التى نعنيها عند الكلام عن «العالم الخارجى الحقيقى» .

لقد رأينا أننا مسوقون إلى أن نرتب تجاربنا ترتيباً زمنياً يجرى على هذا النحو : إذا كان (ب) متأخراً بالنسبة إلى (أ) ، (ح) متأخراً بالنسبة إلى (ب) يكون (ح) متأخراً بالنسبة إلى (أ) أيضاً (تابع التجارب) ولكن ما هو وضع الحوادث التي ربطناها مع التجارب بهذا الخصوص . . . ؟ يبدو واضحاً لأول وهلة أن هناك ترتيباً زمنياً للحوادث يتفق مع الترتيب الزمني للتجارب . لقد كان هذا هو المتبع بوجه عام على غير وعى إلى أن ظهرت فى الأفق شكوك خاصة^(١) . وحتى نصل إلى فكرة العالم الموضوعى فلا نزال فى حاجة إلى تصور بناء آخر . إن الحادثة ليست محددة الموقع بالنسبة إلى الزمن فقط بل وبالنسبة إلى المكان أيضاً .

لقد حاولنا فيما تقدم من السطور أن نصف كيف يمكن أن نربط سيكولوجياً بين تصورات : المكان والزمن والحادثة من ناحية والتجارب من الناحية الأخرى . وهذه التصورات من ناحية المنطق ابتكارات حرة للعقل البشرى . إنها أدوات للفكر القصد منها ربط التجارب فيما بينها بصلة حتى يمكن أن نحصيها جيداً . ومحاولة إدراك الأصول التجريبية التى نبتت منها هذه التصورات الأساسية يجد رهبها أن توضح لنا مدى تقيدها بهذه التصورات وبهذا الشكل نصبح على بينه من مدى حريتنا التى يصعب علينا غالباً عند الاقتضاء استغلالها استغلالاً معقولاً .

(١) فترتيب التجارب زمنياً تبعاً للوسائل السمعية مثلاً يمكن أن يختلف عن ترتيبها زمنياً تبعاً للوسائل البصرية بحيث يتعذر تطابق التتابع الزمني للحوادث مع التتابع الزمني للتجارب .

ولا زال أماننا اعتبار أساسى يجب إضافته إلى هذه الصورة وهو يتعلق بالأصل السيكولوجى لتصورات المكان - زمن - حادثة (وسنسميها بالاختصار شبه الفضائية على عكس التصورات من المحيط السيكولوجى) فلقد ربطنا الفضاء مع تجارب تستخدم الصناديق وترتيب الأجسام المادية فيها . وهكذا يفترض هذا التكوين لهذه التصورات سبق وجود تصور الأجسام المادية (أى الصناديق) وكذلك يلعب بنفس الطريقة الأشخاص الذين كان لزاما أن ندخلهم حتى يتكون التصور الموضوعى للزمن دور الأجسام المادية بهذا الخصوص ولذلك يبدو لى أن تكوين تصور الجسم المادى يجب أن يسبق تصوراتنا للمكان والزمان .

وكل هذه التصورات شبه الفضائية تتعلق فعلا بعصر ما قبل العلم جنباً إلى جنب مع تصورات من المجال النفسى مثل الألم والهدف والغرض . . . إلخ ولكنه من سمات الفكر فى الفيزياء كما هو من خصائص الفكر فى العلم الطبيعى عامة أن يسعى من حيث المبدأ ألا يلجأ إلا إلى التصورات « شبه الفضائية » وحدها ، وأن يجتهد فى التعبير بوساطتها عن كل العلاقات على شكل قوانين . فعالم الفيزياء يجتهد أن يرد الألوان والنغمات إلى اهتزازات كما يجتهد عالم الفسيولوجى فى رد الفكر والألم إلى عمليات عصبية بشكل يستبعد العنصر النفسى بذاته (من حيث هو عنصر نفسى) من سلسلة الاتصال السببية للوجود . وهكذا لا يتدخل هذا العنصر فى أى مكان كحلقة مستقلة فى الارتباطات السببية .

ولاشك أن هذا الوضع الذى يعتبر أن إمكان فهم كل العلاقات أمر مرهون باستعمال التصورات «شبه الفضائية» وحدها هو من حيث المبدأ ما يقصد التعبير عنه هذه الأيام «بالمادية» (طالما أن المادة قد فقدت دورها كتصور أساسى) .

ولكن : لماذا كان علينا أن ندحرج الأفكار والتصورات الأساسية عن الفكر فى العلم الطبيعى من علياء سمائها عند جبال أولب فى أحضان أفلاطون محاولين الكشف عن منبتها الأرضى . . . ؟ لعل ذلك كان أفضل وسيلة لتخليص هذه الأفكار وتحريرها من ربة الطلسم الذى ضرب عليها . وهكذا تحقق حرية أكبر فى تكوين الأفكار والتصورات . والفصل الأكبر فى ذلك يرجع إلى خالدى الذكر دافيد هيوم وأرنست ماك فهما اللذان سبقا الجميع إلى هذا الفهم الناقد .

لقد أخذ العلم عن فكر ما قبل العلم التصورات فضاء ، زمن ، والجسم المادى (مع الحالة الخاصة الهامة «الجسم الجاسىء» ، وحورها وجعلها أكثر دقة فأينعت وكانت أولى ثمراتها المهمة هندسة إقليدس التى يجب أن لا تحجب صيغتها البديهية عن أعيننا منبتها التجريبى (إمكان إزاحة الأجسام عن بعضها البعض أو رصها فوق بعضها البعض) وعلى الأخص طبيعة الفضاء ثلاثية الأبعاد وطابعه الإقليدى فهذا كله أيضا تجريبى الأصل . (يمكن ملؤه كله «بمكعبات » متشابهة البناء) .

وتسامى تصور الفضاء كثيراً بعد أن اكتشفنا أنه ليس هناك أجسام

تامة الجساءة فكل الأجسام مرنة إن قليلاً أو كثيراً وتتغير أحجامها تبعاً لتغير درجة حرارتها أيضاً . وعلى ذلك فالإنشاءات التى يجب وصف تطابقاتها الممكنة بوساطة هندسة إقليدس لا يمكن تمثيلها بعيداً عن التصورات الفيزيائية . ولكن لما كانت الفيزياء آخر الأمر مضطرة إلى استخدام الهندسة فى إقامة تصوراتها فإن المضمون التجريبي للهندسة لا يمكن تقريره أو اختباره إلا فى إطار الفيزياء كلها .

ويجب أن لا يغيب عن بالنا فى هذا الخصوص الفكرة الذرية (الذريات) وتصورها عن القابلية للانقسام المحدد لأن الفضاءات ذات الامتداد دون الذرى لا يمكن قياسها . وتضطرنا الذريات أيضاً إلى التخلي من حيث المبدأ عن فكرة السطوح المحددة تماماً واستاتيكية والتي تحد الأجسام الصلبة . وليس هناك إذا راعينا الدقة قوانين دقيقة حتى على مستوى الحيز الكبير للتشكيلات الممكنة للأجسام الجاسئة التى تتلامس .

وعلى الرغم من هذا لم يفكر أحد فى التخلي عن تصور الفضاء لأنه كان يبدو مما لا يمكن الاستغناء عنه فى مجموع نظام العلم الطبيعى ، وكان ، مرضياً جداً . ولقد كان ماك فى القرن التاسع عشر هو الوحيد الذى فكر جدياً فى حذف تصور الفضاء . عندما فكر فى أن يستبدله بفكرة مجموع المسافات اللحظية بين كل النقط المادية (لقد حاول ذلك ابتغاء الوصول إلى فهم أكمل للقصور الذاتى) .

المجال :

يلعب الفضاء والزمن في ميكانيكا نيوتن دوراً مزدوجاً ، فهماً أولاً يؤيدان دور الحامل أو الهيكل لما يحدث في الفيزياء والذي تلند إليه وصف الحوادث عن طريق إحداثيات المكان والزمن . وتعتبر المادة من حيث المبدأ مكونة من « نقط مادية » تكون حركاتها الحوادث الفيزيائية . وعندما تعتبر المادة ملتزمة البناء ، لا يكون ذلك إلا مؤقتاً في تلك الحالات التي لا نريد أو لا نلتطيع أن نصف البناء الحبيبي . وفي هذه الحالة تعامل الأجزاء الصغيرة (عناصر الحجم) من المادة معاملة النقط المادية على الأقل طالما كنا نهتم بمجرد الحركات لا بالوقائع التي ليس ممكناً الآن ، أو لا فائدة ترجى من إسنادها للحركات (أى تغيرات درجة الحرارة أو العمليات الكيميائية) أما الدور الثانى للفضاء والزمن فقد كان يتلخص في أنهما «مجموعة قصورية» وكانت المجموعات القصورية تمتاز دائماً على كل مجموعات الإسناد الممكن تصورها بأن قانون القصور الذاتى صحيح بالنسبة لها .

والنقطة الأساسية فى كل هذا هى أن الحقيقة الفيزيائية - ونعتبرها ملتزمة عن الأشخاص الذين يكابدونها - تبين أنها تتكون على الأقل من حيث المبدأ من المكان والزمن من ناحية والنقط المادية دائمة الوجود من الناحية الأخرى والتي تتحرك بالنسبة للزمن والفضاء . ويمكن التعبير بشكل عنيف عن فكرة الوجود المتقل للزمن والمكان على هذا النحو .

لو كان لازماً أن تكتفى المادة لبقى الزمن والمكان وحدهما (كنوع من المرح للحوادث الفيزيائية) .

ولقد جاء تذليل هذه العقبة نتيجة لتقدم كان يبدو لأول وهلة عديم الصلة بمشكلة المكان - زمن . وأعنى به ظهور «تصور المجال» وغايته الأخيرة هي أن يحل من حيث المبدأ محل فكرة الجليم (النقطة المادية) . ولقد ظهر تصور المجال فى هيكل الفيزياء الكلاسيكية على أنه تصور ملاعد فى الحالات التى عولجت فيها المادة باعتبارها متصلا . مثال ذلك : عند معالجة توصيل الحرارة فى جلم جاسىء توصف حالة الجلم بذكر درجة الحرارة فى كل نقطة من نقطة عند كل لحظة محددة . وهذا يعنى رياضياً أن درجة الحرارة ء تصور على أنه تعبير رياضى (دالة) لإحداثيات المكان والزمن ر (مجال درجة الحرارة) ويمثل قانون توصيل الحرارة على أنه علاقة محلية (معادلة تفاضلية) تضم كل الحالات الخاصة لتوصيل الحرارة . ودرجة الحرارة هنا مثال بليط لتصور المجال فهى كمية (أو مركب كميات) تكون دالة للإحداثيات والزمن . وهناك مثال آخر هو وصف حركة اللائل . ففى كل نقطة من نقطة توجد فى أية لحظة سرعة توصف كمياً بمركباتها الثلاث بالنثبة إلى محاور مجموعة إحداثيات (متجه) ومركبات اللرعة فى نقطة ما هنا أيضاً (مركبات المجال) دوال للإحداثيات (س ، ص ، ش) والزمن ز .

ومن مميزات المجالات التى ذكرناها أنها تحدث فقط داخل كتلة ذات

وزن . وهى تستخدم فقط لوصف حالة ما لهذه المادة . وتمشياً مع التطور التاريخى لتصور المجال نجد أنه لا يمكن أن يوجد المجال حيث لا توجد المادة . ولكن ظهر فى الربع الأول من القرن التاسع عشر أن ظواهر حركة الضوء والتداخل يمكن تفسيرها بوضوح مذهب باعتبار الضوء مجال موجى يشبه تماماً مجال الاهتزاز الميكانيكى فى جسم جاسىء مرن . وهكذا نشأت ضرورة إدخال مجال يمكن أيضاً أن يوجد فى «الفضاء الفارغ» فى غياب المادة ذات الوزن .

ولقد أدت بنا هذه الحالة إلى موقف غاية فى الإشكال . ذلك لأن تصور المجال فى أول ظهوره كان - تمشياً مع نشأته - مقصوراً على وصف حالات فى داخل الجسم ذى الوزن ، وكان هذا يبدو مؤكداً بقدر اقتناعنا بأن كل مجال يجب أن يعتبر حالة قابلة للتفسير الميكانيكى ، وكان هذا الأمر يفترض مقدماً وجود المادة ولهذا أصبحنا مضطرين حتى فى الفضاء الذى اعتبرناه حتى الآن خالياً إلى افتراض وجود شكل من المادة فى جميع أجزائه وسمى هذا الشكل الأثير .

ولقد كان تخلص تصور المجال من زعم ارتباطه بفكرة حامل ميكانيكى حدثاً من أهم الأحداث سيكولوجيا التى دفعت الفكر الفيزيائى إلى الأمام .

فقد اتضح خلال النصف الثانى من القرن التاسع عشر بوضوح متزايد مرتبط من أبحاث فرادى وماكسويل أن التعبير عن العمليات

الكهرومغناطيسية فى حدود المجال أفضل كثيراً من التعبير عنها على أساس التصورات الميكانيكية للنقط المادية . ولقد نجح ماكسويل بتطبيق فكرة المجال فى التنبؤ بوجود الأمواج الكهرومغناطيسية التى لم يكن تماثلها الأساسى مع أمواج الضوء موضع شك نظراً لأن سرعة كليهما واحدة . وتبعاً لهذا ابتلعت من حيث المبدأ الكهرباء الديناميكية علم البصريات ، وكان الأثر السيكلوجى لهذا التقدم الهائل هو أن اكتسب تصور المجال تدريجياً استقلالاً أكبر من مواجهة الهيكل المكينى للفيزياء الكلاسيكية .

ومع هذا فقد كان من المسلم به أول الأمر أن المجالات الكهرومغناطيسية يجب تفسيرها على اعتبارها حالات للأثير وحاول العلماء بكل همة ونشاط تفسير هذه الحالات ميكانيكياً . ولكن بعد أن تعثرت هذه المحاولات وباءت بالفشل بصورة مستمرة أخذ العلم يقلع تدريجياً عن هذه المحاولات . ولو أن الاقتناع بأن المجالات الكهرومغناطيسية لا مناص من اعتبارها حالات للأثير ظل باقياً . وكان هذا هو الموقف حتى مطلع هذا القرن .

ولقد قامت فى أعقاب نظرية الأثير هذه الأسئلة : كيف يسلك الأثير من وجهة النظر الميكانيكية بالنسبة إلى الأجسام ذات الوزن ؟ هل يلعب دوراً فى حركات الأجسام أم تظل أجزاؤه فى حالة سكون بالنسبة إلى بعضها البعض ؟ . ولقد أجريت تجارب فذة للإجابة على هذه الأسئلة

وذهب إلى أن سرعة هذه المسحورين تتغير مع المسافة
الثابتة تبعاً لحركة الأرض اللثوية و «أثر دوبلر» أى تأثير الحركة اللثوية
للنجوم الثابتة على تردد الضوء الذى يصل إلينا منها بالمقارنة بالترددات
المعروفة للإرسال . ولقد استطاع ه . أ لورنتز تفليس جميع هذه الأمور
والتجارب ما عدا واحدة هى تجربة ميكلن - مورلى - على أساس أن
الآثير لا يشترك فى حركة الأجسام ذات الوزن وأن أجزاءه لا تتحرك
إطلاقاً بالنسبة إلى بعضها البعض . وهكذا ظهر الآثير كما لو كان
تجليداً للفضاء اللاكن إطلاقاً . ولكن أبحاث لورنتز ذهبت إلى أبعد من
ذلك فقد فلرت كل العمليات الكهرومغناطيلية والبصرية داخل المادة ذات
الوزن والنسبة كانت معروفة فى ذلك الحين على أساس أن تأثير الأجسام
ذات الوزن على المجال الكهربائى - والعكس - راجع إلى مجرد أن
الجسيمات التى تكون المادة تحمل شحنات كهربائية تشترك مع الجسيمات
فى الحركة . أما فيما يتعلق بتجربة ميكلن - مورلى فقد أوضح لورنتز
أن نتيجهتها لا تتعارض على الأقل مع نظرية الآثير اللاكن .

وعلى الرغم من هذه الإنتصارات الرائعة لم تكن حالة النظرية
مرضية تماماً للأسباب التالية . أن الميكانيكا الكلاسيكية - وليس هناك
شك فى أنها تتفق والواقع - كتقريب أول تعلمنا تكافؤ كل المجموعات
القصورية أو «الفضاءات» القصورية لصياغة القوانين الطبيعية أو عدم تغير
هذه القوانين عند الانتقال من مجموعة قصورية إلى أخرى . وتعلمنا

«التجارب» الكهرومغناطيلية والبصرية نفس الشيء بدقة فائقة فى حين أن أساس النظرية الكهرومغناطيلية يعلمنا أن مجموعة قصورية خاصة يجب أن تعطى الأفضلية وهى الأثير المضى اللاكن . وهذه النظرة التى انطوى عليها الأساس النظرى كانت غير مرضية إلى أبعد الحدود فهل هناك تعديل لهذا الأساس يجعل - كما فى الميكانيكا الكلاسيكية - تكافؤ المجموعات القصورية حقيقة واقعية (مبدأ النسبية الخاصة) . . . ؟

إن الجواب على هذا اللؤال هو نظرية النسبية الخاصة ، وتحفظ من نظرية ماكسويل - لورنتز بفرض ثبوت سرعة انتقال الضوء فى الفضاء الخالى . وحتى يكون هناك توافق تام بين هذا وبين تكافؤ المجموعات القصورية (مبدأ النسبية الخاص) لابد من التكلّى عن فكرة الطابع المطلق للآنية . وبالإضافة إلى ذلك لابد من تطبيق تحويلات لورنتز لإحداثيات المكان والزمن عند الانتقال من مجموعة قصورية إلى أخرى . إن كل مضمون النظرية النسبية الخاصة يتضمنه هذا الفرض : « جميع قوانين الطبيعة لا تتغير بالنسبة لتحويلات لورنتز » . وأهم ما فى هذا القيد هو أنه يحد قوانين الطبيعة الممكنة بصورة محددة واضحة المعالم .

والآن ما هو وضع نظرية النسبية الخاصة بالنسبة إلى مشكلة الفضاء . . . ؟

أولاً يجب أن نحذر الرأى القائل بأن رباعية أبعاد الحقيقة أدخلت حديثاً لأول مرة بواسطة هذه النظرية فى الفيزياء فحتى فى الفيزياء

البحرسيه ذات احاديه يحدد موضعها باربعه اعداد . تاريخه إحدانيات
مكانية وإحداثي زمني . وعلى ذلك كان مجموع الحوادث الفيزيائية موسداً
فى متنوع مستمر رباعى الأبعاد ؛ ولكن هذا المتصل الرباعى الأبعاد ينقسم
موضوعياً تبعاً للميكانيكا الكلاسيكية إلى زمن أحادى الأبعاد وإلى
قطاعات مكانية ثلاثية الأبعاد . ويحتوى الفريق الأخير منها على الحوادث
الآتية وهذا الانقسام واحد بالنسبة لكل المجموعات القصورية . وتزامن
حادثتين معينتين بالنسبة إلى مجموعة قصورية واحدة يعنى آتية هاتين
الحادثتين بالنسبة إلى كل مجموعات الإسناد القصورية . وهذا هو المعنى
الذى نقصده عندما نقول إن الزمن فى الميكانيكا الكلاسيكية مطلق ولكن
الزمن من وجهة نظر نظرية النسبية الخاصة ليس كذلك . صحيح أن
جماع الحوادث الآتية مع حادثة مختارة قائم بالنسبة إلى مجموعة قصورية
خاصة ولكن لم يعد مستقلاً عن اختيار مجموعة الإسناد . إن المتصل
الرباعى الأبعاد لم يعد الآن قابلاً للانقسام موضوعياً إلى قطاعات كل
منها يحوى حوادث آتية . إن « الآن » تفقد بالنسبة للعالم الذى هو امتداد
فضائى ، معناها الموضوعى ولأجل هذا يجب اعتبار الزمن والمكان متصلين
رباعى الأبعاد غير قابل للانقسام موضوعياً . إذا كنا نريد أن نعبر عن
مضمون العلاقات الموضوعية دون تعسفات اتفاقية غير ضرورية .

ولما كانت نظرية النسبية الخاصة قد أوضحت التكافؤ الفيزيائى لكل
المجموعات القصورية فقد أثبتت أن فرض الأثير الساكن لا محل له .

وعلى ذلك أصبح ضرورياً أن نتخلى عن فكرة أن المجال الكهرومغناطيسى يجب أن يعتبر كمجرد حالة لحامل مادي . وهكذا دخل المجال من أوسع الأبواب وأصبح عنصراً لا يستغنى عنه فى الوصف الفيزيائى له نفس الأهمية التى لتصور المادة فى نظرية نيوتن .

لقد وجهنا جل اهتمامنا حتى الآن إلى الوقوف على أوجه التحوير والتعديل الذى أدخلته نظرية النسبية الخاصة على تصورى المكان والزمن . ودعنا الآن نلقى نظرة على العناصر التى نقلتها هذه النظرية عن الميكانيكا الكلاسيكية . هنا أيضاً لا تكون القوانين الطبيعية صحيحة إلا إذا اتخذنا مجموعة قصورية أساساً لوصف الزمن مكان . إن مبدأ القصور ومبدأ ثبوت سرعة الضوء صحيحان بالنسبة إلى مجموعة قصورية فقط ، ولا يمكن أن تكون قوانين المجال أيضاً صحيحة أو ذات معنى إلا بالنسبة إلى المجموعات القصورية فقط . وهكذا كما فى الميكانيكا الكلاسيكية نجد أن المكان هنا أيضاً مركبة مستقلة فى تمثيل الحقيقة الفيزيائية فإذا تخيلنا زوال المادة والمجال بقى المكان القصورى أو على الأدق بقى هذا المكان والزمن الذى يتصل به . إن الفكرة السائدة عن البناء الرباعى الأبعاد (فضاء منكوفسكى) هو أنه حامل للمادة والمجال أما الفضاءات القصورية مع الأزمنة المتصلة بها فمجرد مجموعات إحدائية متنازة تتصل أو تترابط معاً بواسطة تحويلات لورنتز الخطية . وحيث إنه لم يعد يوجد فى هذا البناء رباعى الأبعاد أى قطاع يمثل «الآن» موضوعياً فإن تصورى الحدوث

والصيرورة لم يتوقف أو يلغيا تماما ولكنهما تعقدا للغاية وعلى ذلك يبدو طبيعياً جداً أن نعتبر الحقيقة الفيزيائية وجوداً رباعى الأبعاد بدلا من اعتبارها كما فعلنا حتى الآن تطوراً لوجود ثلاثى الأبعاد .

وهذا الفضاء الجاسى رباعى الأبعاد فى نظرية النسبية الخاصة هو إلى حد ما نظير رباعى الأبعاد لاثير لورنتز الجاسى ثلاثى الأبعاد وبالنسبة إلى هذه النظرية أيضا نرى أن مايلى صحيح : إن وصف الحالات الفيزيائية يفترض أن المكان موجود من قبل وأن وجوده مستقل ، وهكذا نجد أنه حتى هذه النظرية لا تبدد ضيق ديكارت فيما يتعلق بالوجود المستقل أو «الأولى» «حقا للفضاء الفارغ» إن الهدف الحقيقى للمناقشة الأولية التى قدمناها هنا هو أن نوضح إلى أى مدى تغلبت نظرية النسبية العامة على هذه الشكوك .

تصور الفضاء فى نظرية النسبية العامة

لقد نشأت هذه النظرية أصلا من محاولة لفهم تساوى الكتلة القصورية والكتلة الجاذبية . والآن دعنا نبدأ من مجموعة قصورية س_١ فضاءها من وجهة النظر الفيزيائية فارغ أو بعبارة أخرى لا يواجه فى الجزء من الفضاء محل الاعتبار أية مادة (بالمعنى المعتاد) ولا أى مجال (بالمعنى المقصود فى نظرية النسبية الخاصة) وهب أن هناك بالنسبة إلى س_١ مجموعة إسناد أخرى س_٢ تتحرك بعجلة منتظمة . وعلى ذلك لا تكون س_٢ بهذا الشكل مجموعة قصورية فبالنسبة إلى س_٢ سوف تتحرك

كل كتلة اختبارية بعجلة مستقلة عن طبيعتها الفيزيائية والكيميائية وعلى ذلك يكون هناك بالنسبة إلى س_٣ حالة هي على الأقل تقريب أول إلى مجال الجاذبية . وهكذا يكون التصور التالي متفقاً مع الوقائع المشاهدة : إن س_٣ تكافئ أيضاً « مجموعة قصورية » ولكن يوجد بالنسبة لها مجال جاذبي (متجانس) (لا داعي للتعرض لمصدره هنا) وهكذا تفقد المجموعة القصورية مغزاهما الموضوعي عندما يتدخل المجال الجاذبي في هيكل الموضوع إذا سلمنا بأن «مبدأ التكافؤ» هذا يمكن أن يمتد إلى أية حركة نسبية كانت لمجموعة الإسناد . إننا إذا استطعنا أن نضع نظرية متماسكة على أساس هذه الأفكار فإنها ستتفق تلقائياً مع حقيقة تساوى الكتلة الجاذبية والكتلة القصورية وهي حقيقة تؤيدها التجربة بقوة .

ومن وجهة النظر رباعية الأبعاد يناظر الانتقال من س_١ إلى س_٣ تحويلاً لا خطياً للإحداثيات الأربعة وهنا يواجهنا هذا السؤال : أى أنواع التحويلات الخطية هو المسموح به ؟ أو كيف يمكن تعميم تحويل لورنتز . . . ؟ وللإجابة على هذه السؤال يعتبر ما يلي حاسماً :

إننا نخصص المجموعة القصورية في النظرية الأسبق بهذه الخاصية تقاس الفروق بين الإحداثيات بقضبان القياس الجاسئة الثابتة وتقاس الفروق في الزمن بالساعات الساكنة . وأول هذين الفرضين يكمله فرض آخر ينص على أن نظريات إقليدس عن الأطوال تنطبق على عمليات القياس بالقضبان الساكنة . ونستطيع أن نستدل بسهولة من نتائج نظرية

النلبية الخاصة على أن هذا التفجير الفيزيائي المباشر للإحداثيات يعتبر مفقوداً بالنسبة إلى مجموعة الإسناد س_٣ التي تتحرك بعجلة بالنسبة إلى المجموعة س_١ . ولكن إذا كان هذا هو الوضع فإن الإحداثيات الآن لا تعبر إلا عن نظام أو رتبة محاسة أو استمرار الفضاء ، وعلى ذلك أيضاً تعبر عن الرتبة البعدية للفضاء ولكنها لا تعبر عن أية خاصية من خواصه القياسية . وهكذا نجد أنفسنا ملاقين إلى أن نمد التحويلات إلى تحويلات تحكمية ملتزمة^(١) وهذا يلتوجب المبدأ العام للنلبية :

« يجب أن تكون القوانين الطبيعية - متعددة التغير مع التحويلات التحكمية الملتزمة للإحداثيات » وهذا المطلب (مرتبطاً مع مطلب توفر أكبر بلاطة منطقية ممكنة للقوانين يحد القوانين الطبيعية العامة محل الاعتبار بأقوى مما كان في مبدأ النلبية الخاصة .

وتقوم هذه اللللة من الأفكار أساساً على اعتبار المجال تصوراً ملتقلاً لأن الأحوال اللائدة بالنسبة إلى س_٣ تفلر على أنها مجال جاذبي دون أن تثار ملألة وجود الكتل التي ينشأ عنها هذا المجال . وبفضل سللة الأفكار هذه يمكن أيضاً أن نقف على سبب كون قوانين المجال الجاذبي البحت أقوى من حيث الاتصال المباشر بفكرة النلبية العامة من قوانين المجالات التي من نوع عام (عندما يكون مثلاً هناك مجال كهرومغناطيلي) .

(١) قد نفي طريقة التعبير غير الدقيقة هذه بالغرض المطلوب هنا .

ولدينا سند قوى إذ نفرض أن فضاء منكوفلكى الخالى من المجال يمثل حالة خاصة ممكنة فى القانون الطبيعى بل إنها فى الحقيقة أبسط حالة خاصة يمكن تصورها . ويتميز مثل هذا الفضاء من حيث طابعه القياسى بأن $\epsilon^2_{س١} + \epsilon^2_{س٢} + \epsilon^2_{س٣}$ هو مربع الفترة المكانية - مقيلاً بوحدة القياس - بين نقطتين متقاربتين إلى ما لانهاية من قطاع ملتعرض لشبه فضاء ثلاثى الأبعاد (نظرية فيثاغورث) بينما $\epsilon_{س٤}$ هو الفترة الزمنية - مقيلاً بقياس مناسب للزمن - بين حادثتين تشتركان فى الإحداثيات $(س١ ، س٢ ، س٣)$ ومعنى هذا كله ببساطة هو أن مغزى موضوعنا قياسياً قد أعطى للكمية :

$$\epsilon^2_{ف٢} = \epsilon^2_{س١} + \epsilon^2_{س٢} + \epsilon^2_{س٣} - \epsilon^2_{س٤} \quad (١)$$

كما اتضح ذلك من قبل بملاعدة تحويلات لورنتز ويقابل هذا الأمر رياضياً شرط كون $\epsilon^2_{ف٢}$ لا متغير بالنسبة إلى تحويلات لورنتز .

والآن إذا أخضعنا وفقاً للمبدأ العام للنسبية هذا الفضاء (انظر المعادلة (١)) لتحويل تحكىى ملتزم للإحداثيات عندئذ يعبر عن الكمية ذات المغزى الموضوعى $\epsilon^2_{ف٢}$ فى مجموعة الإحداثيات الجديدة بالعلاقة .

$$\epsilon^2_{ف٢} = \epsilon^2_{س١} + \epsilon^2_{س٢} + \epsilon^2_{س٣} - \epsilon^2_{س٤} \quad (١١)$$

التي يجب ان نحصل إلى ما فوق السس م ، ق نحن السواحي ١١
 ١٢ . . . إلى ٤٤ وليست الحدود حم ق في هذه الحالة ثوابتاً بل دوال
 للإحداثيات يحددها التحويل التحكيمي المختار . ومع ذلك فليست الحدود
 حم ق دوالاً تحكيميّة للإحداثيات الجديدة ولكنها مجرد دوال من نوع يجعل
 شكل المعادلة (١ أ) من الممكن إعادة تحويله إلى شكل المعادلة (١)
 بوساطة تحويل مستمر للإحداثيات الأربعة وحتى يمكن أن يحدث هذا
 يجب أن تحقق الدوال حم ق معادلات عامة معينة شرطية متعددة التغير
 اشتقها ريمان منذ أكثر من نصف قرن قبل مجيء نظرية النسبية (شرط
 ريمان) وتبعاً لمبدأ التكافؤ نصف المعادلة (١ أ) بشكل متعدى التغير عام
 مجال جاذبي من نوع خاص عندما تحقق الدوال حم ق شرط ريمان .

تبعاً لما تقدم نجد أن قانون المجال الجاذبي البحت يجب أن يتحقق
 عندما يتحقق شرط ريمان ولكنه لا بد أن يكون أضعف وأقل تعقيداً من
 شرط ريمان . وبهذه الطريقة يتحدد تماماً عملياً قانون المجال البحت ولن
 نقدم هنا مبررات هذه النتيجة تفصيلاً (خطوات الوصول إليها) .

إننا الآن في وضع يسمح لنا أن نرى إلى أى مدى يحور الانتقال
 إلى نظرية النسبية العامة تصور الفضاء . لقد كان للفضاء (الزمكان) وفقاً
 للميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة وجوداً مستقلاً عن المادة
 والمجال . وحتى يمكن أن نقوم بأى وصف لذلك الذى يملأ الفضاء
 ويعتمد على الإحداثيات يجب أن ننظر فوراً إلى الزمكان أو المجموعة

القصورية بخواصها القياسية على اعتباره موجوداً وإلا كان وصف « ذاك الذى يملأ الفضاء » لا معنى له^(١) . ولكن تبعا لنظرية النسبية العامة من الناحية الأخرى ليس للفضاء فى مواجهة « ما يملأ الفضاء » الذى يعتمد على الإحداثيات وجوداً مستقلاً . وهكذا يمكن أن يوصف مجال جاذبى بحث فى حدود حم^ق (كدوال للإحداثيات) يحل معادلات الجاذبية : إننا إذا تصورنا أن المجال الجاذبى أى الدوال حم^ق قد أزيل فإنه لا يتبقى هناك فضاء من النوع (١) بل لا شيء على الإطلاق ولا « فضاء طوبولوجى » أيضاً لأن الدوال حم^ق لا تصف المجال وحده فقط ولكنها تصف فى نفس الوقت الخواص البنائية الطوبولوجية القياسية للمتنوع . وفضاء من النوع (١) ليس من زاوية نظرية النسبية العامة فضاء بدون مجال بل حالة خاصة من فضاء حم^ق ليس لها فى حد ذاتها معنى موضوعياً - لها قسم لا تعتمد على الإحداثيات - فليس هناك شيء من نوع الفضاء الخالى أى فضاء بدون مجال . أن الزمكان لا يدعى لنفسه وجوداً بذاته بل كمجرد صفة بنائية للمجال .

وهكذا لم يكن ديكارت بعيداً عن الصواب حينما اعتقد أنه يجب استبعاد وجود فضاء فارغ . إن هذه الفكرة تبدو حقاً شديدة السخف طالما أننا لا نرى الحقيقة الفيزيائية إلا فى الأجسام ذات الوزن . ولقد رأينا أننا

(١) إذا تخيلنا أن ما يملأ الفضاء « (أى المجال) قد أزيل يتبقى لنا الفضاء المترى (القياسى) المتفق مع (١) الذى يمكن أن يحدد السلوك القصورى لجسم اختيار يوضع فيه .

لكى ندرك تماماً اللب الحقيقي لفكرة ديكارت وكنهها استوجب الأمر أن نلجأ إلى فكرة المجال كممثل للحقيقة مرتبطة مع مبدأ النسبية العامة إذ ليس هناك مكان « خال من المجال » .

النظرية المعينة للجاذبية

وعلى ذلك أصبحت نظرية المجال الجاذبي البحث على أساس النظرية النسبية العامة فى تناول اليد لأننا نستطيع الاطمئنان إلى أن قضاء منكوفسكى الخالى من المجال المتفق قياساً مع (أ) بحيث أن يحقق القوانين العامة للمجال . ومن هذه الحالة الخاصة نحصل على قانون الجاذبية عن طريق تعميم خال عملياً من التحكم والخطوات التالية للنظرية لا يحددها بصورة لا نزاع فيها المبدأ للنسبية . لقد تمت عدة محاولات فى اتجاهات مختلفة خلال عشرات السنين القليلة الأخيرة وتشترك كل هذه المحاولات فى اعتبار الحقيقة الفيزيائية مجالا بل وأكثر من ذلك مجالا هو تعميم للمجال الجاذبي يكون فيه قانون المجال بل وأكثر من ذلك مجالا هو تعميم للمجال الجاذبي يكون فيه قانون المجال تعميماً لقانون المجال الجاذبي البحث . وبعد تمحيص طويل أعتقد أنى قد أهدت الآن^(١) إلى

(١) يمكن تصوير التعميم كمايلى : ان المجال الجاذبي البحث حسب اشتقاقه من فضاء

منكوفسكى الخالى له خاصية التماثل التى تعبر عنها : $\gamma_n : \gamma_n = \gamma_n$ ح ن م (ح ١٢) = ح ٢١
..... إلخ) والمجال المعمم من نفس النوع ولكن بدون خاصية التماثل هذه واشتقاق قانون المجال بمائل تماماً لاشتقاق الحالة الخاصة للجذب البحث .

الصفة الطبيعية جداً لهذا التعميم ولكنى لم أستطع حتى الآن أن أقف على حقيقة ما إذا كان هذا القانون المعمم يقوى على الصمود أمام وقائع التجربة أم لا .

ومسألة قانون المجال الخاص ثانوية بالنسبة للاعتبارات العامة السابقة فالسؤال الرئيسى الآن هو : هل يمكن أن تصل بنا نظرية مجال من النوع الذى نتطلع إليه هنا إلى الهدف على الإطلاق ؟ ونعنى بالهدف نظرية تصف وصفاً كاملاً الحقيقة الفيزيائية بما فيها الفضاء رباعى الأبعاد على اعتبارها مجالاً . والجيل الحالى من علماء الفيزياء يميلون إلى الإجابة بالنفى على هذا السؤال حيث يعتقدون وفقاً للشكل الراهن لنظرية الكم أن حالة أية مجموعة فيزيائية ما لا يمكن أن تحدد مباشرة بل بطريق غير مباشر فقط بوساطة النص الإحصائى لنتائج القياس الممكن إجراؤها على المجموعة ويسود الاعتقاد بأن ازدواج الطبيعة الذى تؤكدته التجارب (البناء الجسمى والبناء الموجى) لا يمكن إدراك كنهه إلا بإضعاف تصور الحقيقة . وأعتقد أنه لا مبرر الآن مع معلوماتنا الراهنة لمثل هذا الإنكار النظرى البعيد الأثر وأنه يجدر بنا ألا نقلع عن متابعة المضى فى الطريق الذى مهدته أماننا نظرية المجال النسبية حتى نهايته .

الفهرس

الجزء الاول

نظرية النسبية الخاصة

الصفحة

الموضوع

| | |
|----|--|
| ٧ | التصدير |
| ٩ | مقدمة |
| ٣٩ | المقدمة |
| ٤٥ | الفصل الأول : المعنى الفيزيائى للقضايا الهندسية |
| ٤٩ | الفصل الثانى : مجموعة الأحداثيات |
| ٥٣ | الفصل الثالث : المكان والزمان فى الميكانيكا الكلاسيكية |
| ٥٦ | الفصل الرابع : مجموعة الأحداثيات الجاليلية |
| ٥٨ | الفصل الخامس : مبدأ النسبية بالمعنى المقيد |
| | الفصل السادس : نظرية تركيب السرعات المستعملة فى |
| ٦٢ | الميكانيكا الكلاسيكية |
| | الفصل السابع : التناقض الظاهرى بين قانون انتشار الضوء |
| ٦٣ | ومبدأ النسبية |

| | | |
|-----|------------------|----------------------------------|
| ٦٧ | الفصل الثامن | : فكرة الزمن في الفيزياء |
| ٧٢ | الفصل التاسع | : نسبية الآتية |
| ٧٦ | الفصل العاشر | : حول نسبية تصور المسافة |
| ٧٨ | الفصل الحادى عشر | : تحويل لورنتز |
| | الفصل الثانى عشر | : سلوك الساعات وقضبان القياس |
| ٨٤ | | المتحركة |
| | الفصل الثالث عشر | : نظرية محصلة السرعات (تجربة |
| ٨٧ | | فيزو) |
| ٩١ | الفصل الرابع عشر | : القيمة الكاشفة للنظرية النسبية |
| ٩٣ | الفصل الخامس عشر | : النتائج العامة للنظرية |
| ٩٩ | الفصل السادس عشر | : نظرية النسبية الخاصة والتجربة |
| ١٠٥ | الفصل السابع عشر | : فضاء منكوفسكى رباعى الأبعاد |

الجزء الثانى

نظرية النسبية العامة

| | | |
|-----|------------------|--------------------------------|
| ١١١ | الفصل الثامن عشر | : نظريا النسبية الخاصة والعامة |
| ١١٦ | الفصل التاسع عشر | : مجال الجاذبية |

| | |
|-----|---|
| ١١٩ | الفصل العشرون : تساوى كتلتى القصور والجاذبية (كحجة فى صف المبدء العام للنسبية) |
| ١٢٢ | الفصل الحادى والعشرون : ما هى أوجه النقص فى أسس الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة . . ؟ |
| ١٢٥ | الفصل الثانى والعشرون : استنتاجات قليلة من مبدأ النسبية العامة |
| ١٣٠ | الفصل الثالث والعشرون : سلوك الساعات وقضبان القياس على مجموعة إسنادتدور |
| ١٣٥ | الفصل الرابع والعشرون : المتصل الاقليدى واللاإقليدى |
| ١٣٩ | الفصل الخامس والعشرون : إحداثيات جاوس |
| ١٤٤ | الفصل السادس والعشرون : المتصل الزمان والمكان فى نظرية النسبية الخاصة على اعتبار أنه متصل إقليدى |
| ١٤٧ | الفصل السابع والعشرون : المتصل الزمانى الخاص بالنظرية النسبية العامة ليس متصلا إقليديا |

| | |
|-----|---|
| ١٥١ | الفصل الثامن والعشرون : التعبير الدقيق عن مبدأ النسبية العام |
| ١٥٥ | الفصل التاسع والعشرون : حل مشكلة الجاذبية على أساس المبدأ العام للنسبية |

الجزء الثالث

تأملات في الكون ككل

| | |
|-----|---|
| ١٦٣ | الفصل الثلاثون : الصعوبات الكونية في نظرية نيوتن |
| ١٦٦ | الفصل الحادي والثلاثون : إمكان وجود كون منته ولكنّه غير موجود |
| ١٧٢ | الفصل الثاني والثلاثون : بناء الفضاء للنظرية النسبية العامة |

الملاحق

| | |
|-----|--|
| ١٧٧ | الملاحق الأول : اشتقاق بسيط لتحويل لورنتز |
| ١٨٥ | الملاحق الثاني : فضاء منكوفسكي رباعي الأبعاد |

الموضوع الصفحة

- الملحق الثالث : الإثبات التجريبي لنظرية النسبية العامة ١٨٧
- الملحق الرابع : بناء الفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة ١٩٩
- الملحق الخامس : النسبية ومشكلة الفضاء ٢٠٢

